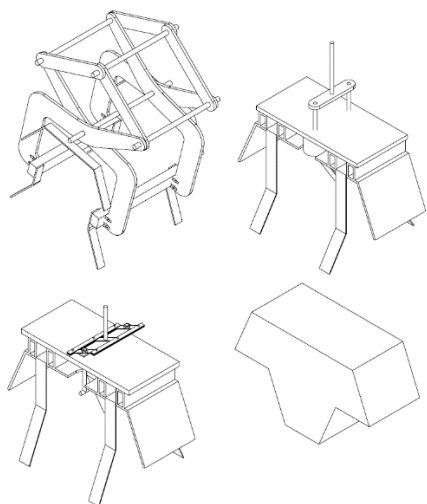


# Etude et développement d'éléments de maçonnerie « drone-compatibles » industrialisables



Mémoire présenté par  
**Georges DENEFFÉ**

en vue de l'obtention du grade de master en  
**Ingénieur civil des constructions**

Promoteur  
**Pierre LATTEUR**

Lecteurs  
**Haythem GHARSALLAOUI, Sébastien GOESSENS, Benoît PARDOEN**

Année académique 2017-2018



# Résumé

Suite à l'apparition de la technologie des drones et l'élargissement de celle-ci dans de plus en plus de secteurs, le milieu de la construction tend également à faire usage de ces petits robots volants aux multiples compétences et avantages. Depuis quelques années, Pierre Latteur, professeur à l'Université Catholique de Louvain, travaille sur le développement d'un modèle constructif nouveau basé sur l'utilisation des drones. Plusieurs travaux d'étudiants effectués dans le cadre de leur thèse de Master ont permis peu à peu d'imaginer, de simuler voire de tester les premières solutions proposées au problème du système de construction « drone-compatible ». L'étude d'éléments de maçonnerie adaptés à ce nouveau système a cependant présenté un inconvénient commun aux répercussions économiques notables : l'obtention d'éléments de formes complexes et par conséquent coûteux à fabriquer de façon industrielle. Sur base de ce constat, cette thèse vise à imaginer et développer de nouveaux éléments de maçonnerie drone-compatibles à la forme plus simple, facile et bon marché à produire en masse. Une typologie d'éléments aux nombreux avantages y est présentée, développée et étudiée dans tous ses aspects : ergonomie, dimensions optimales, résistance, techniques de mise en place, production en industrie et adaptation à la construction traditionnelle. Les essais en laboratoire de la typologie, appelée « DEPT et GGS associé », ont été effectués et sont ensuite décrits en fin de ce travail.



# Remerciements

L'auteur tient à adresser ses profonds remerciements aux personnes suivantes :

- M. Pierre Latteur, professeur à l'Ecole Polytechnique de Louvain, pour avoir proposé et permis la réalisation d'une nouvelle thèse sur le sujet du développement du système constructif drone-compatible, ainsi que ses conseils avisés apportés tout au long de l'année ;
- M. Sébastien Goessens, assistant à l'Ecole Polytechnique de Louvain, pour sa grande disponibilité, sa précieuse aide dans les nombreux domaines touchant aux travaux réalisés en laboratoire, sa mise à disposition d'une imprimante 3D et sa faculté à proposer des solutions aux problèmes rencontrés ;
- L'ensemble des techniciens du Laboratoire d'Essais Mécaniques, Structures et Génie Civil, pour leur aide parfois même spontanée, leur soutien, leurs conseils très utiles lors des travaux effectués en laboratoire et la bonne ambiance de travail qui y règne ;
- M. Michaël Daris, pilote expérimenté de drone et fondateur de RC TakeOff, pour avoir mis à disposition ses compétences dans le pilotage de drone utilisé lors d'essais en laboratoire ;
- L'ensemble des étudiants ayant précédemment travaillé sur le sujet, notamment Adrien Naveau, pour la transmission de documents riches en enseignement, ainsi que Jean-François Leboutte et Vincent Parisel pour leurs conseils préliminaires pour la réalisation d'éléments d'essais ;
- Proches, famille et amis, pour leur soutien continu durant cette année et l'intérêt porté aux recherches et travaux réalisés.



# Table des matières

|                                                                                                              |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>RÉSUMÉ.....</b>                                                                                           | <b>I</b>   |
| <b>REMERCIEMENTS.....</b>                                                                                    | <b>III</b> |
| <b>TABLE DES MATIÈRES .....</b>                                                                              | <b>V</b>   |
| <b>INTRODUCTION.....</b>                                                                                     | <b>1</b>   |
| <b>CHAPITRE 1: CHOIX D'UNE TYPOLOGIE D'ÉLÉMENT DE MAÇONNERIE<br/>DRONE-COMPATIBLE INDUSTRIALISABLE .....</b> | <b>7</b>   |
| <b>1.1. Cahier des charges d'un élément drone-compatible .....</b>                                           | <b>9</b>   |
| 1.1.1. Masse limitée .....                                                                                   | 9          |
| 1.1.2. Assemblage par gravité.....                                                                           | 10         |
| 1.1.3. Reprise des imprécisions géométriques .....                                                           | 10         |
| 1.1.4. Élément préhensible.....                                                                              | 13         |
| 1.1.5. Facilité de fabrication .....                                                                         | 13         |
| 1.1.6. Résistance .....                                                                                      | 13         |
| <b>1.2. Formes existantes précédemment étudiées .....</b>                                                    | <b>14</b>  |
| 1.2.1. Les dricks.....                                                                                       | 14         |
| 1.2.2. Les droxels.....                                                                                      | 18         |
| 1.2.3. L'importance du caractère « industrialisable » .....                                                  | 19         |
| <b>1.3. Procédés de fabrication industrielle d'éléments de maçonnerie .....</b>                              | <b>19</b>  |
| 1.3.1. Introduction.....                                                                                     | 19         |
| 1.3.2. Fabrication par moulage .....                                                                         | 19         |
| 1.3.3. Fabrication par presse et vibrage .....                                                               | 20         |
| 1.3.4. Fabrication par extrusion .....                                                                       | 22         |
| <b>1.4. Nouvelle idée et choix d'une typologie d'élément .....</b>                                           | <b>23</b>  |
| 1.4.1. Déplacement de la complexité .....                                                                    | 23         |
| 1.4.2. Développement de formes possibles .....                                                               | 24         |
| 1.4.3. Avantages et adaptation du système constructif .....                                                  | 27         |
| <b>CHAPITRE 2: DÉVELOPPEMENT DU DEPT (DRICK EXTRUDABLE<br/>PROGRESSIVE TRIANGULAR).....</b>                  | <b>31</b>  |
| <b>2.1. Modèle de départ.....</b>                                                                            | <b>33</b>  |
| <b>2.2. Etude paramétrique .....</b>                                                                         | <b>34</b>  |
| 2.2.1. Objectif .....                                                                                        | 34         |
| 2.2.2. Description des dimensions .....                                                                      | 34         |
| 2.2.3. Calcul des dimensions optimales .....                                                                 | 45         |
| <b>2.3. Réduction du poids.....</b>                                                                          | <b>47</b>  |
| 2.3.1. DEPT à creux transversaux.....                                                                        | 47         |

|                                                                                                          |               |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| 2.3.2. DEPT à creux verticaux .....                                                                      | 48            |
| <b>2.4. Modèle d'essai .....</b>                                                                         | <b>50</b>     |
| 2.4.1. Paramètres extérieurs .....                                                                       | 50            |
| 2.4.2. Matériau constitutif .....                                                                        | 50            |
| 2.4.3. Choix de dimensions .....                                                                         | 50            |
| 2.4.4. Élément de test .....                                                                             | 51            |
| <b>2.5. Intégration aux éléments de maçonnerie traditionnelle.....</b>                                   | <b>51</b>     |
| 2.5.1. Le DEPT-b.....                                                                                    | 52            |
| 2.5.2. Le DEPT-c et DEPT-cb .....                                                                        | 52            |
| 2.5.3. Le DEPT-t.....                                                                                    | 53            |
| 2.5.4. Le DEPT-e et le DEPT-eb .....                                                                     | 53            |
| 2.5.5. Le DEPT-lx et le DEPT-lb.....                                                                     | 54            |
| 2.5.6. Autres DEPT dérivés .....                                                                         | 55            |
| 2.5.7. Conclusion .....                                                                                  | 56            |
| <b>2.6. Fabrication du DEPT et de ses dérivés.....</b>                                                   | <b>57</b>     |
| 2.6.1. Introduction.....                                                                                 | 57            |
| 2.6.2. Fabrication par extrusion .....                                                                   | 57            |
| 2.6.3. Fabrication par presse et vibration .....                                                         | 57            |
| 2.6.4. Fabrication par moulage .....                                                                     | 59            |
| 2.6.5. Conclusion .....                                                                                  | 59            |
| <br><b>CHAPITRE 3: DÉVELOPPEMENT DE GGS ASSOCIÉS (GRIPPING AND GUIDING SYSTEMS).....</b>                 | <br><b>61</b> |
| <b>3.1. Cahier des charges .....</b>                                                                     | <b>63</b>     |
| 3.1.1. Préhension du DEPT et sécurité en vol.....                                                        | 63            |
| 3.1.2. Guidage du DEPT lors de la pose et précision.....                                                 | 63            |
| 3.1.3. Guidage du GGS lors de la préhension et précision .....                                           | 64            |
| 3.1.4. Autres critères.....                                                                              | 65            |
| <b>3.2. Systèmes de préhension .....</b>                                                                 | <b>65</b>     |
| 3.2.1. Système à électro-aimants.....                                                                    | 66            |
| 3.2.2. Système à pince de levage .....                                                                   | 67            |
| 3.2.3. Système avec rotation de tiges en forme T .....                                                   | 68            |
| 3.2.4. Système à gonflement de membrane .....                                                            | 69            |
| 3.2.5. Résumé .....                                                                                      | 70            |
| <b>3.3. Systèmes de guidage (ou systèmes de reprise de l'imprécision latérale de pose du drone).....</b> | <b>70</b>     |
| 3.3.1. Système par guides latéraux.....                                                                  | 70            |
| 3.3.2. Système par butées verticales latérales .....                                                     | 73            |
| 3.3.3. Système par serrage postpose .....                                                                | 74            |
| 3.3.4. Amélioration du système par guides latéraux : rainures latérales verticales dans l'élément.....   | 76            |
| 3.3.5. Résumé .....                                                                                      | 79            |
| <b>3.4. Couplage des systèmes de préhension et des systèmes de guidage pour le DEPT .....</b>            | <b>79</b>     |
| 3.4.1. GGS-EM .....                                                                                      | 79            |
| 3.4.2. GGS-G .....                                                                                       | 80            |
| 3.4.3. GGS-T .....                                                                                       | 82            |
| <b>3.5. Système de guidage latéral et longitudinal.....</b>                                              | <b>82</b>     |
| <br><b>CHAPITRE 4: FABRICATION DES DEPT ET DES GGS D'ESSAIS .....</b>                                    | <br><b>85</b> |

|                                                                                       |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>4.1. Fabrication des DEPT d'essais.....</b>                                        | <b>87</b>  |
| 4.1.1. Réalisation de moules et coulage de premiers blocs .....                       | 87         |
| 4.1.2. Composition de béton .....                                                     | 94         |
| 4.1.3. Adaptation aux GGS .....                                                       | 96         |
| 4.1.4. Blocs fabriqués .....                                                          | 99         |
| 4.1.5. Conclusion .....                                                               | 102        |
| <b>4.2. Fabrication de systèmes de préhension et de guidage .....</b>                 | <b>102</b> |
| 4.2.1. Servomoteurs .....                                                             | 103        |
| 4.2.2. GGS-EM .....                                                                   | 105        |
| 4.2.3. GGS-G .....                                                                    | 108        |
| 4.2.4. GGS-T .....                                                                    | 111        |
| 4.2.5. Conclusion .....                                                               | 116        |
| <b>CHAPITRE 5: ESSAIS EN LABORATOIRE .....</b>                                        | <b>117</b> |
| <b>5.1. Essais manuels de préhension .....</b>                                        | <b>119</b> |
| 5.1.1. GGS-EM .....                                                                   | 119        |
| 5.1.2. GGS-G .....                                                                    | 119        |
| 5.1.3. GGS-T .....                                                                    | 120        |
| <b>5.2. Essais manuels de pose.....</b>                                               | <b>121</b> |
| 5.2.1. Essais avec le GGS-EM et le GGS-T.....                                         | 121        |
| 5.2.2. Essais avec le GGS-G .....                                                     | 124        |
| 5.2.3. Essais avec le GGS-G et DEPT à rainures verticales.....                        | 125        |
| 5.2.4. Conclusion .....                                                               | 125        |
| <b>5.3. Essais avec drone.....</b>                                                    | <b>125</b> |
| 5.3.1. Essais avec le GGS-EM .....                                                    | 126        |
| 5.3.2. Essais avec le GGS-G .....                                                     | 127        |
| 5.3.3. Essais avec le GGS-T .....                                                     | 129        |
| 5.3.4. Conclusion .....                                                               | 130        |
| <b>5.4. Essais de résistance et de stabilité.....</b>                                 | <b>131</b> |
| 5.4.1. Essais de résistance à la compression .....                                    | 132        |
| 5.4.2. Essai de basculement .....                                                     | 139        |
| <b>CONCLUSION.....</b>                                                                | <b>141</b> |
| <b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>                                                            | <b>147</b> |
| <b>ANNEXES.....</b>                                                                   | <b>149</b> |
| <b>A.1. Essai coefficient de frottement .....</b>                                     | <b>150</b> |
| <b>A.2. Détermination et choix des dimensions optimales .....</b>                     | <b>153</b> |
| A.2.1. Feuille 1 : Données et détermination des dimensions optimales.....             | 153        |
| A.2.2. Feuille 2 : Calcul de $h_{min}$ , $imp_{ang}$ .....                            | 154        |
| <b>A.3. Analyse de stabilité du DEPT - détermination de <math>h_{max}</math>.....</b> | <b>155</b> |
| A.3.1. Stabilité latérale .....                                                       | 155        |
| A.3.2. Stabilité longitudinale - détermination de $a_{min}$ avec force en tête .....  | 156        |
| A.3.3. Stabilité longitudinale - détermination de $a_{min}$ avec force en aile .....  | 157        |

|                                                                         |            |
|-------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>A.4. Plans du DEPT et ses dérivés .....</b>                          | <b>158</b> |
| <b>B.1. Précisions dimensionnelles de DEPT d’essais par moule .....</b> | <b>172</b> |
| <b>B.2. Compositions de béton utilisées.....</b>                        | <b>173</b> |
| <b>B.3. Essais de compression sur cubes .....</b>                       | <b>174</b> |
| <b>B.4. Essai de chargement des électro-aimants .....</b>               | <b>175</b> |
| <b>B.5. Liste des blocs fabriqués .....</b>                             | <b>177</b> |
| <b>C.1. Essais de pose.....</b>                                         | <b>178</b> |

# Introduction





## ***Vers une révolution dans la construction***

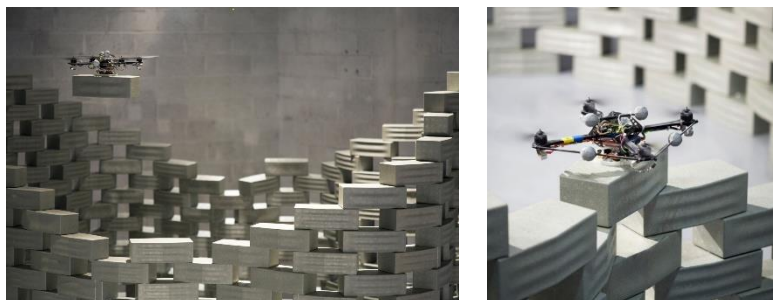
Nombreux sont les domaines où l'utilisation de drones se révèle, depuis plusieurs années maintenant, être une révolution. Que ce soit dans le commercial à travers la livraison aérienne de colis ou dans la sécurité publique en donnant un nouvel outil d'observation discret et peu coûteux à la police notamment, ces petits engins légers commandés à distance sont devenus un réel outil dans bon nombre d'applications. Et il est bon à penser que leur utilisation n'a pas été explorée dans tous les domaines où ils pourraient mener à un bouleversement des habitudes.

Et parallèlement, il est à constater que le milieu de la construction est loin d'être optimisé: gaspillage de matériaux, coût de main d'œuvre élevé, imprécisions et erreurs nombreuses sur chantier ou encore difficulté de raccourcir les délais dépendant directement (et trop) des ressources humaines. C'est alors que l'idée de l'automatisation de la construction fait son chemin, comme on peut comparer avec la robotisation massive dans l'industrie automobile. Faire usage de robots commandés à distance ou programmés pour exécuter de manière autonome une tâche peut ainsi présenter de nombreux avantages et des économies énormes.

Cela dit, le secteur de la construction comporte plusieurs acteurs et domaines: on ne construit pas une maison avec uniquement des maçons, mais également avec des architectes, des ingénieurs, des ardoisiers, etc. Et il est évident que, à moyen terme, on ne peut envisager l'automatisation que d'une petite partie de ces acteurs et corps de métier. La première étape qui semble la plus réalisable est d'automatiser le gros-œuvre, qui assemble après tout, si on ose le résumer de la sorte, des pièces élémentaires (pour ce qui est de constructions classiques, comme des maisons unifamiliales dans un premier temps).

C'est sur base de ces constats et réflexions que depuis 2015, l'Université Catholique de Louvain s'est lancée dans l'étude et le développement d'une intégration des capacités des drones à la construction. Ces études sont supervisées depuis lors par Pierre Latteur, professeur à l'Université, et Sébastien Goessens, qui réalise une thèse sur le sujet d'un système constructif drone-compatible.

L'UCL a également pu compter par le passé sur une collaboration sur le sujet avec le Massachusetts Institute of Technology aux Etats-Unis. L'Ecole polytechnique fédérale de Zurich en Suisse (ETH Zurich) s'est, elle, déjà penchée sur l'automatisation du fonctionnement d'une flotte de petits drones permettant d'assembler des blocs en mousse en laboratoire (Figures 1).



*Figures 1 - Assemblage de blocs en mousse par une flotte de drone à l'ETH Zurich*

## ***Le système drone-compatible***

Jean-Sébastien Breton et Justin Leplat, dans leurs travaux en 2014 et 2015 (1), ont étudié la faisabilité de mettre en place un tel système constructif. Un constat à en tirer est que le développement de ce nouveau système s'accompagne d'un changement notoire dans la façon de développer et réaliser l'ouvrage.

En effet, envisager de construire un bâtiment à l'aide de drones demande à la source de concevoir ce bâtiment et les éléments qui le composent de manière drone-compatible. C'est-à-dire décomposer la structure du bâtiment en éléments qui pourront être assemblés par les drones eux-mêmes.

En fait, cette nouvelle façon de construire comportera 4 étapes, imaginées par M. Reniers dans son travail sur le développement d'outils BIM élémentaires pour les systèmes de constructions drone-compatibles en 2016 (2). Ces étapes sont décrites ci-dessous et illustrées dans la Figure 2:

1. conception de la structure par les architectes et ingénieurs, c'est-à-dire la réalisation des plans d'architectes et d'ingénieurs et la création d'un modèle 3D BIM du bâtiment;
2. modélisation de la structure en éléments drone-compatibles, consistant, comme dit plus haut, à décomposer la structure du bâtiment en éléments drone-compatibles;
3. traduction de cette modélisation en instructions à communiquer aux drones;
4. construction à l'aide des drones qui exécutent les instructions écrites dans l'étape précédente.

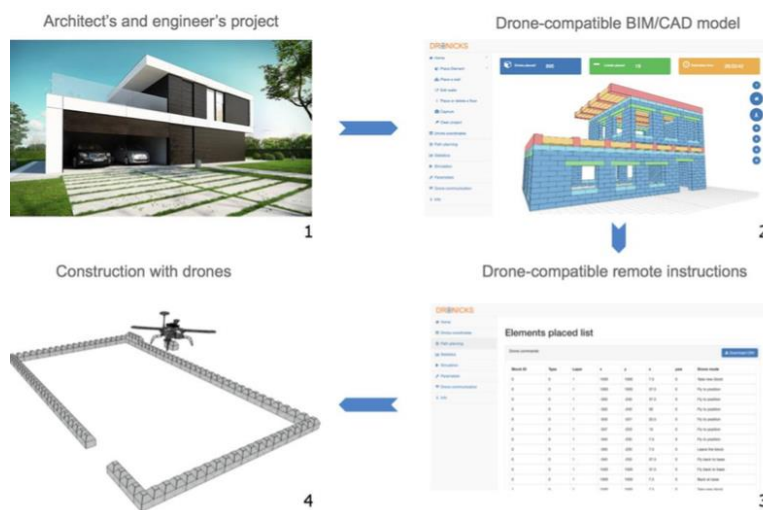


Figure 2 - Etapes élémentaires du système constructif drone-compatible

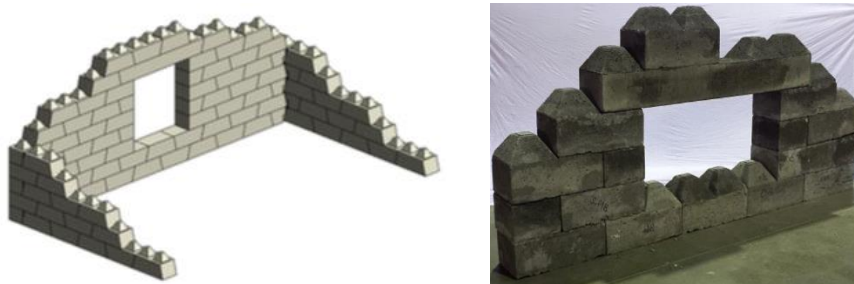
### ***L'élément de maçonnerie drone-compatible***

Outre l'imagination de systèmes de localisation et de guidage des drones ou l'écriture de programmes de décomposition d'une structure en un ensemble d'éléments particuliers, le développement d'un système constructif drone-compatible demande l'étude et l'imagination d'éléments de maçonnerie adaptés. Et la chose est plus complexe qu'il n'y paraît, puisqu'ils devront répondre à un cahier des charges contraignant décrit dans la suite de ce travail. L'utilisation de blocs rectangulaires classiques et les voiles coulés en place n'est plus possible dans ce nouveau système constructif. Les éléments devront être déplacés et assemblés par drone, tout en garantissant à la structure la même résistance que dans la construction classique.

Depuis plusieurs années, des étudiants et chercheurs se sont penchés sur le développement de tels éléments. Et beaucoup de pistes ont été imaginées voir explorées, menant à scinder la réflexion en 2 parties.

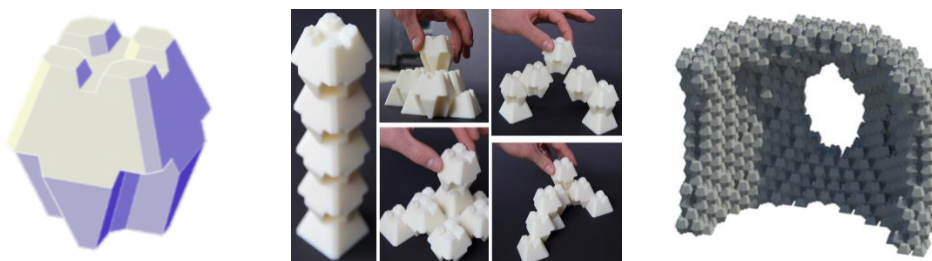
Premièrement, axer la recherche sur des éléments permettant la construction de structures simples comme des maisons unifamiliales ou des bâtiments simples. Des structures composées donc de murs droits, de coins, de linteaux, d'ouvertures rectangulaires classiques, etc. C'est ce qu'ont fait par exemple

Vincent Parisel et Jean-François Leboutte dans leurs travaux en 2017 (3). Les éléments obtenus sont alors appelés des “dricks”, dénomination née de la contraction de “drone” et “bricks” (Figures 3).



Figures 3 - Exemples de mur en dricks

Deuxièmement, Jean-Sébastien Breton et Justin Leplat en 2015 (1) ont imaginé un élément polyvalent permettant la construction de structures plus complexes: arcs, voûtes, murs arrondis, etc. Le “droxel” (contraction de “drone” et “voxel” - pixel en 3D) permet alors la construction de bâtiments aux architectures plus complexes (Figures 4).



Figures 4 - Droxel et exemples de structures à base de droxels

### ***Un élément “industrialisable”***

Les éléments imaginés dans tous ces précédents travaux se caractérisent par une forme complexe, résultant de la difficulté à obtenir des éléments drone-compatibles simples. Cette complexité de forme entraîne la question du coût de fabrication de tels éléments. C’est un facteur important si on désire obtenir un système constructif économiquement compétitif par rapport à la construction traditionnelle à base de blocs rectangulaires simples ou d’éléments coulés sur place. De là découle la nécessité de trouver des éléments drone-compatibles au coût de fabrication réduit. Il est logique d’étudier en amont la façon de laquelle sont fabriqués les blocs béton et autres éléments de maçonnerie à l’heure actuelle.

### ***Objectifs du travail***

L’objectif premier de ce travail sera d’imaginer et développer des éléments drone-compatibles au coût de fabrication réduit (chapitre 1). L’idée est donc de développer une forme de blocs simple et bon marché à produire, en gardant toutefois son caractère drone-compatible, une certaine ergonomie et des caractéristiques de résistance suffisantes. On entend par forme simple, une forme dont la fabrication sera possible à l’aide des procédés de fabrication d’éléments de maçonnerie traditionnelle et dont le coût de cette fabrication sera réduit. Une section sera donc également consacrée à l’étude de ces procédés courants, visant à intégrer les éléments développés dans des procédés de fabrication existants et économiques.

C’est sur base d’une nouvelle façon de voir le lien physique entre le drone et l’élément lui-même lors de son transport qui permettra d’obtenir un élément atteignant tous ces objectifs.

Ensuite, nous développerons dans tous ses détails l'élément retenu: le DEPT (Drick Extrudable Progressive Triangular) (chapitre 2). D'abord, une étude paramétrique liant dimensions, poids et ergonomie du bloc sera proposée afin d'optimiser sa forme et ses dimensions de celui-ci. Un modèle d'essai sera ensuite défini et permettra la mise en œuvre des tests à échelle réelle. Puis, nous verrons comment, sur base de cette technologie d'éléments de maçonnerie et l'ensemble de ses dérivés, nous pouvons aboutir à la construction de structures simples: maisons unifamiliales, immeubles à architecture rectangulaire et autres constructions élémentaires. Finalement, les moyens de produire en masse le DEPT de façon industrielle seront proposés.

Le développement du système de préhension, c'est-à-dire le lien physique entre le drone et l'élément à placer, sera le troisième objectif. La réflexion à propos de ces systèmes sera effectuée en considérant la nouvelle tâche qui lui est attribuée par le choix de la typologie d'éléments (chapitre 3).

Une fois le modèle d'essai de l'élément et le système de préhension développés, l'étape suivante sera la préparation de tests en laboratoire. Il y sera détaillé la façon dont les blocs de tests et le système de préhension ont été fabriqués et les difficultés qui en ont résulté (chapitre 4).

La description des essais qui ont suivi permettra de déterminer si la typologie d'éléments étudiée remplit toutes les conditions pour prétendre au titre d'élément de maçonnerie drone-compatible. Des enseignements seront tirés de ces essais en laboratoire en vue d'améliorer au mieux le système développé (quatrième objectif, chapitre 5).

# Chapitre 1: Choix d'une typologie d'éléments de maçonnerie drone-compatibles industrialisables



Ce chapitre présente les étapes qui ont permis l'obtention d'une nouvelle forme d'élément drone-compatible. La principale caractéristique recherchée est sa facilité de fabrication.

Dans un premier temps, les propriétés et caractéristiques que doivent respecter ces éléments seront énoncées et illustrées. La partie sera conclue par une note sur la simplicité de la forme, qui entraînera une fabrication moins complexe de l'élément obtenu.

La partie suivante sera consacrée aux recherches effectuées précédemment sur ces formes au cours des dernières années. La présentation et la description de ces blocs permettra de mieux comprendre la difficulté d'imaginer des éléments drone-compatibles à la forme simple.

Un constat émanera alors concernant une caractéristique commune de ces éléments : leur complexité de forme, et la difficulté qui en résulte de produire ces éléments en quantité industrielle. Dans le but d'imaginer de nouvelles formes d'éléments plus simples à fabriquer, une recherche préalable sera effectuée sur les différents procédés de fabrication d'éléments de maçonnerie traditionnelle qui existent à l'heure actuelle.

Enfin, dans la dernière partie de ce chapitre, il sera expliqué l'idée innovante sur base de laquelle une nouvelle gamme de dricks a pu être imaginée. Une de ces typologies de dricks sera choisie et deviendra la base de notre étude dans les chapitres suivants : le « Drick Extrudable Progressif Triangular » ou « DEPT ». Cela dit, quelques inconvénients découleront de cette nouvelle « idée » et les adaptations du système constructif proposées en réponse à ces écueils seront développées à la fin de ce chapitre.

## 1.1. Cahier des charges d'un élément drone-compatible

Les éléments ayant comme fonctionnalité de pouvoir être assemblés par drone, ils doivent respecter plusieurs caractéristiques propres à cette technologie et qui les différencient des éléments de maçonnerie traditionnelle.

### 1.1.1. Masse limitée

La première contrainte est la limitation de la masse des éléments. Un drone n'est pas capable de soulever et transporter un élément dont la masse est supérieure à sa charge utile. On peut bien-sûr envisager des drones de plus en plus puissants, mais avec comme conséquence handicapante une autonomie réduite, et des tailles et coûts d'achat élevés. L'objectif dans le développement du système constructif drone-compatible est l'utilisation d'une flotte de petits drones travaillant de concert pour poser les dricks un à un. Il est donc important de limiter leur taille et leur encombrement.

L'objectif est donc de faire un compromis entre taille et charge utile du drone. L'étude est basée sur la charge utile du drone d'essais développé à l'Université catholique de Louvain (Figures 5). Cette charge utile vaut environ 30kg.



*Figures 5 - Drone d'essais*

Dans le cadre de ces recherches, on a considéré, pour garantir une maniabilité suffisante du drone lors des tests, une masse de bloc maximale de 15kg.

Il est donc important de limiter la masse des dricks, tout en maximisant ses dimensions; le but étant d'assembler le moins de dricks possible pour construire la structure la plus grande possible. Deux solutions s'offrent alors à nous: réduire le volume de matière qui compose l'élément, ou réduire le poids volumique du matériau utilisé.

Réduire le volume de matière consiste alors à imaginer des formes creuses, en retirant la matière là où elle n'est pas à pour garantir la solidité de la structure finale. Il sera proposé dans la section 2.3 une étude sur le sujet et l'obtention d'éléments creux dérivés de l'élément étudié.

Réduire le poids volumique du matériau utilisé, qui sera du béton dans toute la suite de ce travail, a déjà précédemment été étudié par Adrien Naveau et Amaury Moncourrier en 2016 (4). L'utilisation d'Argex et Argex concassé en substitut du gravier et du sable va diminuer sensiblement la densité du béton. Une

composition de béton proposée par Jean-François Leboutte et Vincent Parisel (3), reprise dans le Tableau 1 sera considérée lors de la suite de notre étude.

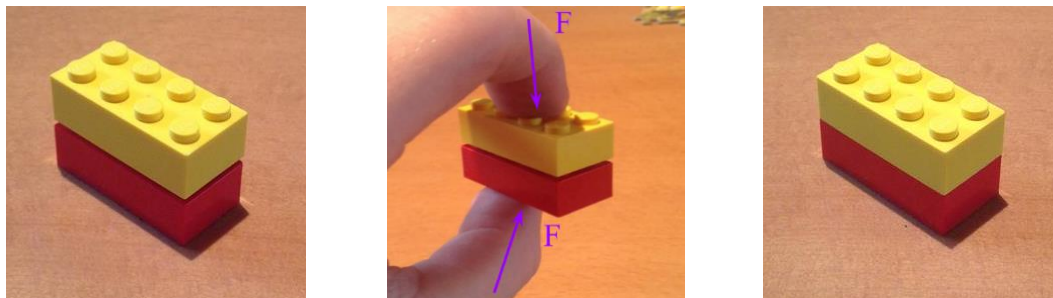
| Ingrédient          | Poids [kg] | Volume [L] | Remarque |
|---------------------|------------|------------|----------|
| Ciment C32.5        | 9          |            |          |
| Eau                 | 4          |            |          |
| Argex               | 5          |            |          |
| Argex concassé      | 8          |            |          |
| Polystyrène expansé |            | 0          |          |
| Aérateur            |            | 0.02       |          |
| Accélérateur        |            | 0.02       |          |

Tableau 1 - Composition de béton (JF. Leboutte et V. Parisel)

Ajoutons qu'à l'avenir, une augmentation de la charge utile des drones conçus permettrait d'atteindre des éléments de maçonnerie d'une masse maximale de 50 à 100kg. Cette augmentation pourra être répercutée sur les proportions et les dimensions des dricks. Tout cela pourra être déterminé sur base de l'étude paramétrique qui sera présentée en section 2.2, où seront étudiées les dimensions optimales du DEPT en fonction notamment de la charge utile du drone utilisé.

### 1.1.2. Assemblage par gravité

L'autre défi est de penser des éléments qui s'assembleront sous la seule force de la gravité. Ils seront déposés par le drone à leur emplacement, sans pouvoir subir une impulsion ou une force additionnelle, comme celle qu'un enfant apporte pour assembler deux pièces de Lego® (Figures 6).



Figures 6 - Application d'une force pour assembler deux pièces Lego®

L'objectif est que, de par sa forme et sa masse, l'élément déposé s'assemble parfaitement avec les autres sans nécessiter de force extérieure autre que celle résultant de la gravité. Il faut alors que les surfaces inférieures du bloc posé soit directement en contact avec les surfaces supérieures des éléments déjà en place.

Pour assurer la cohésion des blocs, il faudra alors imaginer un substitut au mortier que l'on connaît dans la construction traditionnelle. Une réflexion à ce propos sera proposée en section 1.4.3.3.

### 1.1.3. Reprise des imprécisions géométriques

Cette caractéristique est sans aucun doute la plus contraignante dans le développement d'éléments drone-compatibles. Elle résulte du fait qu'un drone ne jouit pas d'une précision spatiale parfaite, c'est-à-dire que la position du drone, et donc de l'élément à poser, n'est pas parfaitement la même que celle recherchée. Et ces imprécisions proviennent de plusieurs facteurs.

Le premier concerne l'imprécision provenant du système de localisation du drone. Puisqu'à terme l'objectif est d'automatiser le travail des drones, un système de géolocalisation et de guidage doit être développé (Figure 7).

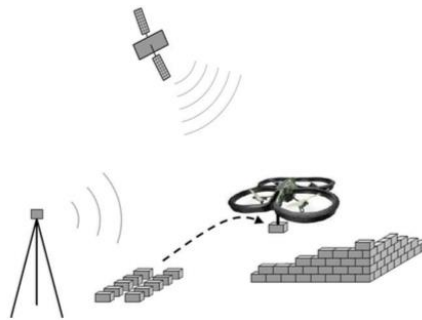


Figure 7 - Système de localisation du drone

De nombreux systèmes de localisation et de guidage développés ou en cours de développement sont ici donnés à titre informatif: localisation GPS, localisation par laser, localisation par caméra, etc. Des recherches en cours sur le sujet tendent à obtenir un système de localisation à la fois fonctionnel et le plus précis possible mais aucun n'a encore été obtenu.

Les imprécisions varient d'un système à l'autre, et s'établissent à l'heure actuelle dans l'ordre de la dizaine de centimètres. Des études en cours tendent à minimiser cette erreur, mais elle existera toujours.

Le second concerne les contraintes extérieures, et notamment le vent. Sur chantier, le vent est inévitable, et modifiera la position du drone et de l'élément à poser à tout moment, surtout à l'instant précis de la pose. D'autres imprévus extérieurs peuvent aussi influencer le positionnement final de l'élément: la présence de matière non-désirée à l'interface des blocs, les précipitations, les mouvements possibles du système de préhension, etc.

On constate que même malgré l'élimination à terme presque totale de l'imprécision due au système de localisation, il faudra toujours prévoir une imprécision conséquente des contraintes extérieures et surtout de l'impact du vent. Et ces imprécisions ne sont pas à négliger: l'amplification des décalages par addition étage après étage de celles-ci donnera lieu à des conséquences catastrophiques: ruine précipitée, finitions visuellement inacceptables, mauvais emboîtement d'éléments secondaires comme des châssis, etc.

Dans la suite du travail, nous considérerons une imprécision à reprendre par l'élément de 5cm (Figure 8), étant en fait celle obtenue lors de tests en laboratoire avec un drone piloté par un pilote qualifié après plusieurs phases d'essais successifs. On estime alors que cette précision devrait se rapprocher de la précision de drone en conditions extérieures après l'obtention future d'un système de localisation utilisable.

Cette imprécision à corriger signifie que, concrètement, un élément posé à 5cm trop sur la droite ou la gauche dans l'axe du mur ou dans quel qu'autre axe devra finir sa course à l'emplacement qui lui a précisément été affecté (Figure 8).

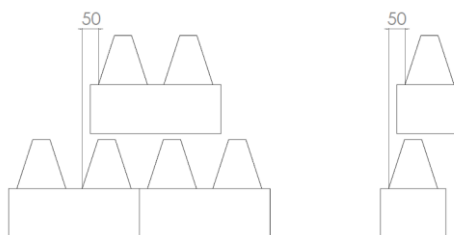


Figure 8 - Imprécision géométrique du drone

Cette valeur est une hypothèse forte. Mais comme pour la masse dans la section 1.1.1, la modification de cette valeur de l'imprécision spatiale pourra être répercutée sur les proportions et dimensions du drone. Et cette étude sera également proposée pour le DEPT en section 2.2.

Pour solutionner ce problème, l'idée est de donner aux éléments une forme permettant à l'élément mis en place de glisser sur les éléments inférieurs jusqu'à atteindre la position désirée. Il faut donc imaginer des éléments composés de faces inclinées qui permettront un assemblage précis.

Les éléments devront alors être composés de faces inclinées de deux types: les premières (a) dans la partie supérieure du bloc, sur lesquelles glisseront les secondes (b) placées en partie inférieures du bloc (Figure 9).

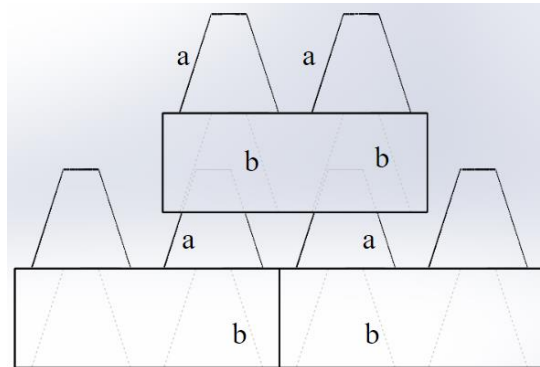


Figure 9 - Faces inclinées de l'élément drone-compatible

Il est également important de réfléchir à l'influence des blocs déjà posés lors du placement d'un nouveau bloc. Si on observe la Figure 10, on voit que, même si la forme des blocs corrigera l'imprécision de pose, le bloc (a) se heurtera à l'obstacle qu'est le bloc (b).

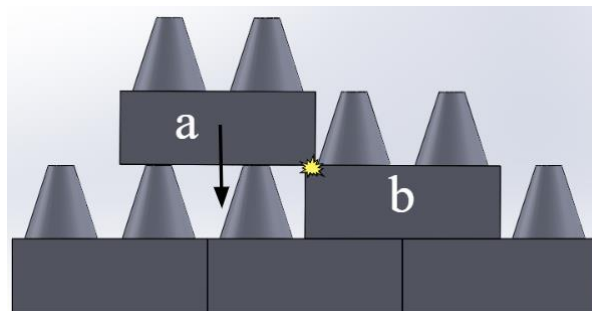


Figure 10 -Obstruction de l'élément à poser

Il faudra alors penser à placer les blocs un par un dans un ordre qui évitera ce genre de situation, ou à donner à l'élément une forme qui évitera de rencontrer une situation similaire.

En fait, ce rôle de correction des imprécisions par les éléments de maçonnerie drone-compatibles est l'origine de leur forme plus complexe comparée à celle de leurs correspondants de la construction traditionnelle.

#### 1.1.4. Élément préhensible

Un élément dit drone-compatible doit forcément pouvoir être chargé puis transporté par ce drone. C'est donc à l'aide d'un système de préhension, qui sera le lien physique entre le drone et le bloc (Figure 11), que le drone pourra saisir, transporter et déposer les éléments.

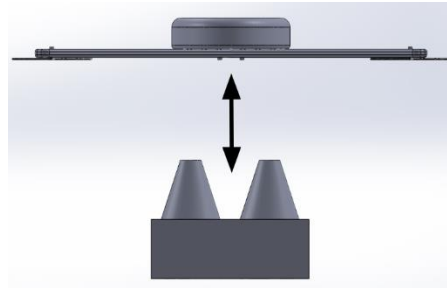


Figure 11 - Lien entre élément et drone

Il est donc nécessaire de tenir compte de cet impératif lors de l'imagination et le développement d'une typologie de drick.

Plusieurs systèmes de préhension seront proposés en section 3.2 de ce travail, ainsi que les modifications correspondantes à apporter à l'élément. Notons que, dans la plupart des cas, un élément développé sur base des autres caractéristiques décrites dans cette section peut être facilement modifié pour s'adapter au système de préhension choisi.

Il est toutefois également envisageable de suivre le raisonnement inverse, en développant des éléments de forme adaptée à un système de préhension préalablement choisi.

#### 1.1.5. Facilité de fabrication

Imaginer un élément drone-compatible avec les critères cités dans les sections 1.1.1 à 1.1.4 mène à obtenir des blocs de formes complexes. En vue à terme d'une fabrication en masse, la complexité de la forme d'un bloc a une grande influence sur la rentabilité du système constructif en développement et donc sur sa compétitivité face aux systèmes constructifs traditionnels.

Sachant que l'objectif final de toutes ces recherches est d'obtenir une technologie efficace et économique, l'important est de penser à développer des blocs à la forme la plus simple possible de façon à réduire les coûts de fabrication. C'est d'ailleurs cette caractéristique qui donnera une orientation dans le choix de la typologie de drick qui sera étudié par la suite dans ce travail (section 1.4).

Notons également qu'à court-terme, un élément à forme simple facilitera la réalisation de moules et accélèrera la production en laboratoire des premiers éléments de test.

La section 1.3 se concentrera d'ailleurs sur l'étude des différents procédés de fabrication des éléments de maçonnerie traditionnelle.

#### 1.1.6. Résistance

Le but premier d'une structure est de tenir debout, c'est-à-dire de résister aux charges de service, aux charges exceptionnelles et aux contraintes extérieures, définies lors de sa conception, et qu'elle subira tout au long de sa vie. Et quelle que soit la méthode de construction utilisée.

C'est pourquoi, lors de l'étude et le développement d'une typologie d'élément drone-compatible, il est indispensable tenir compte qu'une structure composée de ces éléments devra avoir une résistance équivalente à celle composée d'éléments de maçonnerie classique.

Le bloc doit être un minimum résistant aux chocs qu'ils pourraient subir lors de son transport et sa mise en place. Une dégradation d'une de ses faces ou angles induira des imprécisions dans la construction et des dégradations visuelles de la réalisation finie. Comme expliqué précédemment, des éléments drone-compatibles possèdent des formes complexes, avec des surfaces inclinées et donc des angles qui sont des zones propices à des dégradations avant la mise en assemblage dans une structure (Figures 12). Il faudra alors bien veiller à la bonne résistance de certaines parties sensibles de ces éléments.



*Figures 12 - Fragilité des arêtes fines et des faces inclinées*

## 1.2. Formes existantes précédemment étudiées

Dès le lancement de l'étude et du développement d'un système constructif drone-compatible, un des défis centraux a été d'obtenir une forme d'élément optimale, qui respecte les critères énoncés en section 1.1, et possédant des qualités supplémentaires.

De très nombreuses formes d'éléments ont ainsi été imaginées, voire étudiées. L'utilisation de la nouvelle technologie de l'impression 3D a permis une première manipulation des formes conçues, sans passer par l'étape longue et parfois fastidieuse de la fabrication à taille réelle en béton. Des premiers tests manuels sont alors effectués directement après la modélisation 3D des éléments et leur impression à échelle réduite. Des défauts et problèmes inattendus sont alors vite apparus et si possible, corrigés, pour mener à des formes d'élément encourageantes.

Comme expliqué en introduction, il faut considérer 2 types d'éléments: ceux menant à la réalisation de structures simples telles que des maisons unifamiliales (les "dricks") et ceux permettant la construction de structures complexes composées par exemple d'arcs, de voûtes ou simplement de formes arrondies ou inhabituelles (les "droxels").

### 1.2.1. Les dricks

#### **Premières idées**

Les premiers éléments imaginés tendent alors à la volonté de rester proches des formes des éléments de maçonnerie traditionnelle, en y ajoutant la fonctionnalité de reprise des imprécisions de pose. Une forme rectangulaire de base est alors conservée, à laquelle on inclut, un peu à la façon des jouets Lego®, 2 extrusions sur la partie supérieure et 2 intrusions dans la partie inférieure de l'élément, afin d'assurer l'assemblage des blocs.

Pour assurer le glissement des blocs supérieurs sur les blocs inférieurs déjà en place, il faut alors donner des formes inclinées à ces extrusions et intrusions. Les inclinaisons doivent permettre la reprise de

l'imprécision de pose dans la direction x, parallèle à la direction du mur, et dans la direction y, perpendiculaire à cette direction (Figure 13).

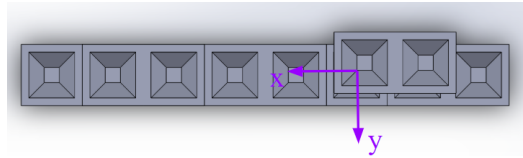
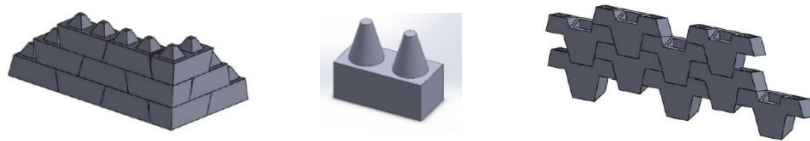


Figure 13 - Reprise de l'imprécision dans les deux directions

Plusieurs exemples de ce type d'éléments sont tirés de travaux précédents (1) (4) (5) et sont donnés à titre illustratif en Figures 14.



Figures 14 - Premiers exemples de dricks

### **Drick60 (A. Naveau et A. Moncourrier)**

Après simple manipulation d'éléments de test imprimés à échelle réduite par impression 3D, un premier défaut apparaît: la pose d'un élément est obstruée par l'élément adjacent déjà en place, comme illustré sur la Figure 10.

Sur base de ce type de forme, Adrien Naveau et Amaury Moncourrier ont choisi de développer et étudier le drick à extrusions et intrusions pyramidales à base rectangulaire dans leur travail en 2016 (4), laissant de côté le drick à extrusions et intrusions coniques. L'ensemble des illustrations qui vont suivre sont reprises de leur TFE. Ils ont basé le début de leur étude sur l'élément en Figure 15. L'ajout d'une partie surélevée au sommet des extrusions pyramidales permet la mise en place des éléments en porte-à-faux (Figure 16).



Figure 15 - Drick60 d'origine

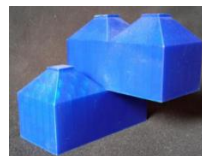


Figure 16 - Drick60 amélioré

La fabrication de blocs et des tests grandeur nature ont alors été menés en laboratoire. Voici ci-dessous quelques illustrations tirées de leur TFE présentant la réalisation de moules (Figures 17), les blocs fabriqués (Figures 18), les études de résistance menées (Figure 19) et les tests d'assemblages réalisés (Figures 20)



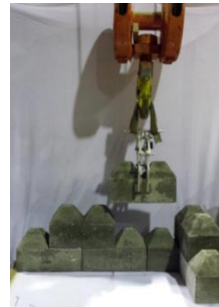
Figures 17 - Réalisation de moules du drick60



Figures 18 - Drick60 fabriqués



Figure 19- Essais de résistance sur le drick60



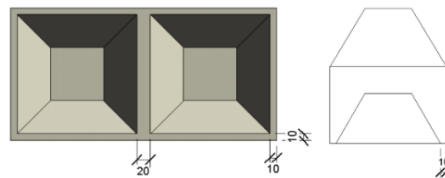
Figures 20 - Essais de pose du drick60

Cependant, cette forme d'élément comporte des angles à épaisseur nulle, difficiles à fabriquer avec précision et surtout très sensibles aux chocs relatifs au transport et à la pose (Figure 21).

Des solutions ont été proposées pour pallier aux inconvénients du drick étudié. D'abord en apportant de l'épaisseur aux bords inférieurs pour éviter des angles à épaisseur nulle (Figures 22).

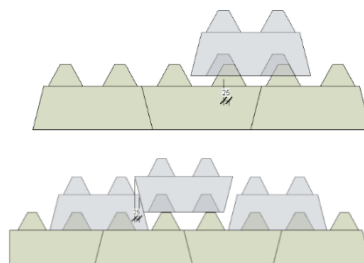


Figure 21 - Angle d'épaisseur nulle



Figures 22 - Epaisseur des bords inférieurs

Puis en intégrant un angle aux faces qui jouent le rôle d'interface entre blocs horizontalement adjacents, pour éviter lors de la pose l'obstruction des blocs par leur voisin (Figures 23).



Figures 23 - Faces longitudinales inclinées

Ces deux modifications entraînent alors une complexification radicale de la forme du Drick60.

## DLP (J.-F. Leboutte et V. Parisel)

Jean-François Leboutte et Vincent Parisel, sur base d'une comparaison éclaircie entre les différentes typologies de dricks existantes, ont eux aussi porté leur étude sur le drick à extrusion et intrusion pyramidales en 2017. Les illustrations qui suivront sont tirées de leur TFE (3).

En partant du même modèle de départ que précédemment (Figure 24), ils y ont apporté quelques modifications: suppression des arêtes d'épaisseur nulle (Figure 25), réduction du poids superflu (Figure 26) et ajout de bandes verticales permettant un bon emboîtement des éléments (Figure 27).

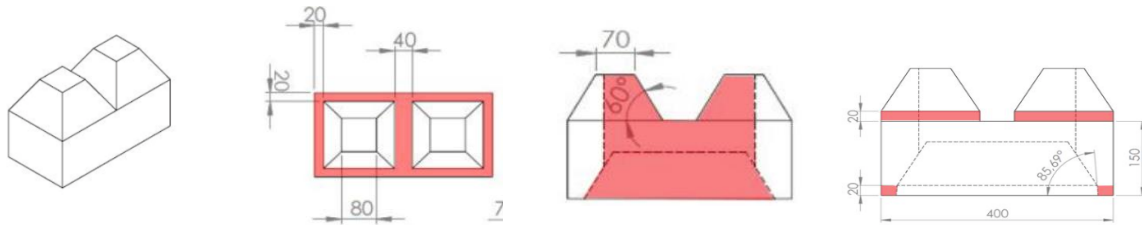


Figure 24 - Drick de base    Figure 25 - Modification 1    Figure 26 - Modification 2    Figure 27 - Modification 3

L'élément obtenu est alors nommé le DLP, Drick Light (masse réduite) Plus (modifications géométriques apportés).

Dans la suite de leur étude, des dérivés du DLP ont été imaginés, permettant d'utiliser cette forme de blocs et ces dérivés pour construire des structures simples de type maisons unifamiliales (Figure 28).

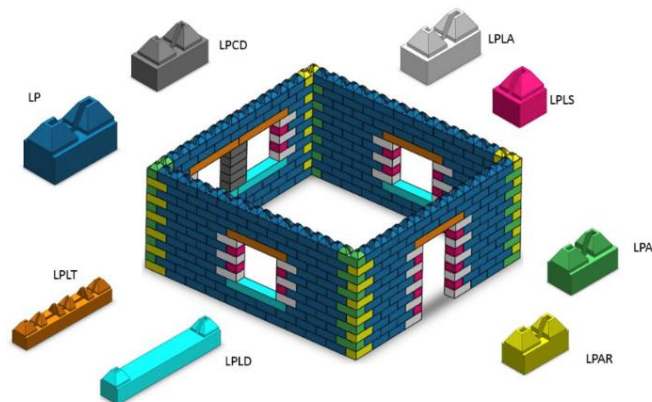


Figure 28 - Structures simples en DLP et ses dérivés

Comme pour l'étude du Drick60, des moules ont été réalisés, des blocs fabriqués et des tests en laboratoire effectués (Figures 29).

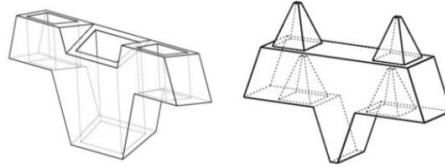


Figures 29 - Réalisation de moule et tests de pose du DLP

En plus de ne pas pallier au problème de gêne de la pose d'un bloc par un bloc adjacent, on retrouve une forme de blocs complexe, dont la fabrication n'est envisageable que via moulage (section 1.3.3).

## Droxels-R ou Drick Progressive

En fait, cette gêne pose problème dans les deux formes de blocs étudiés et plus généralement dans tous les cas d'éléments à forme en profil rectangulaire. Les droxels-R ont alors été imaginés, s'éloignant de la forme des éléments de maçonnerie classique (Figures 30).



Figures 30 - Exemples de droxel-R

En fait, les droxels-R possèdent une caractéristique très efficace pour pallier à la problématique une fois de plus mentionnée ci-dessus. Lors de l'assemblage de ces éléments pour former un mur, un étage complet de blocs est rempli en 2 (voir 3 phases). La phase de pose des blocs (a) sur la Figure 31 remplit partiellement l'étage encadré, après quoi la phase de pose des blocs (b) complète l'étage. La composition d'un étage sera donc progressive, d'où l'appellation « drick progressif ».

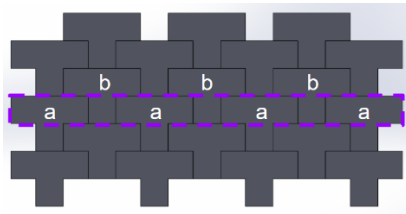


Figure 31 - Construction "progressive"

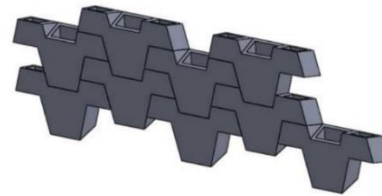


Figure 32 - Exemple de mur en dricks "progressifs"

Grâce à ce système de remplissage en 2 phases, un élément à poser ne doit pas être mis en place juste après un élément adjacent, et donc n'est plus gêné.

Mais les inconvénients notables de ce type d'éléments sont la complexité de leur forme et leur taille nécessaire de l'élément pour reprendre les 5 cm d'imprécision de pose.

### 1.2.2. Les droxels

En 2015, Jean-Sébastien Breton et Justin Leplat (1) imaginent le droxel (contraction de drone et voxel - pixel tridimensionnel) (Figure 33). La forme de cet élément est radicalement différente qu'en maçonnerie traditionnelle, mais offre une infinité de possibilités architecturales. L'assemblage de ces éléments permet d'obtenir arcs, voûtes, porte-à-faux, murs classiques, structures complexes, etc (Figure 34).

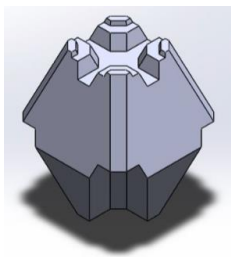


Figure 33 - Droxel

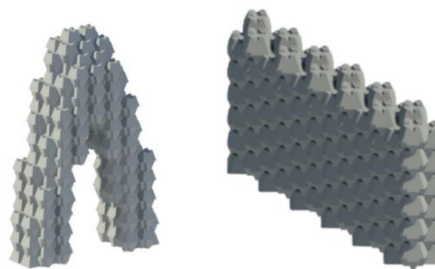


Figure 34 - Exemples de structures en droxels possibles

Cette polyvalence sans pareille induit alors des inconvénients résumés par J.-F. Leboutte et V. Parisel dans leur étude du droxel (3): forme complexe, présence d'interstices entre les éléments une fois assemblés et poids élevé.

### 1.2.3. L'importance du caractère « industrialisable »

Avant de s'aventurer dans le développement d'une nouvelle forme d'élément, il est important de tirer des conclusions des formes déjà proposées et des études réalisées auparavant. Le cahier des charges d'un élément drone-compatible est très contraignant, et mène alors presque indéniablement à des formes complexes.

Dans les recherches précédentes, un point du cahier des charges données en section 1.1 a été placé au second plan: celui de la facilité de fabrication (section 1.1.5). Si bien que les éléments obtenus présentent des formes difficiles à mouler en laboratoire dans un premier temps. Et un système constructif drone-compatible utilisant des éléments fastidieux et donc onéreux à fabriquer à grande échelle aura du mal à concurrencer la construction traditionnelle.

Il faut donc mettre au premier plan le critère de la facilité de fabrication, et rechercher de nouvelles formes d'éléments moins complexes mais tout aussi drone-compatibles. C'est en fait l'objectif central de ce travail, et c'est sur base d'une nouvelle idée qu'une typologie de dricks respectant tous les critères va être développée dans la suite.

La section suivante a pour but de décrire les différents procédés de fabrication d'éléments de maçonnerie traditionnelle. L'objectif étant de s'inspirer de ces procédés afin de réfléchir à des formes de blocs plus simples et plus économiques à produire en masse.

## 1.3. Procédés industriels de fabrication d'éléments de maçonnerie

### 1.3.1. Introduction

Plusieurs procédés traditionnels existent pour fabriquer des éléments de maçonnerie en béton ou en terre cuite. Les trois procédés les plus répandus sont décrits dans cette section, permettant d'en tirer les avantages et inconvénients. Le coût de fabrication sera le principal critère abordé, puisqu'on vise dans ce travail à développer des éléments de maçonnerie drone-compatibles de forme simple et de coût de fabrication réduit.

Dans le cadre de l'étude de ces procédés, deux usines de fabrication d'éléments de maçonnerie ont été visitées : une usine Weinerberger (6) à Kortemark (Province de Flandre Occidentale, Belgique) en novembre 2017 et l'usine Interbloks (7) à Libramont (Province du Luxembourg, Belgique) en juin 2018 et seront mentionnées dans cette section.

### 1.3.2. Fabrication par moulage

Le moulage d'éléments est le procédé le plus simple à réaliser. Il consiste en 5 étapes :

1. Façonnage du moule de la forme de l'élément à fabriquer (Figure 35) ; le moule peut être en bois, en métal, en résine ou bien d'autres matériaux. Le choix de ce matériau dépend surtout du type et de la forme de l'élément, de la robustesse du moule désirée et la précision dimensionnelle exigée
2. Coulage du béton liquide dans le moule, recouvrant toutes ses parois, après son malaxage et la mise en place d'huile de démoulage sur les parois

3. Séchage du béton, d'une période d'environ 24 heures, en conditions définies
4. Démoulage des éléments, par démontage du moule
5. Réutilisation du moule s'il est recyclable; le nombre de cycles dépend du type de matériau utilisé et de l'usure du moule



*Figure 35 - Exemple de moule utilisé pour la fabrication de blocs de béton*

Cette technique est la plus polyvalente : n'importe quelle forme d'élément, de la plus simple à la plus complexe, peut être fabriquée de cette façon. Le béton coulé peut être riche en particules fines et très liquide, permettant d'obtenir des éléments avec une qualité de surface supérieure.

Cependant, le procédé par moulage est le plus lent et le moins rentable économiquement : les éléments doivent sécher dans leur moule environ 24h après le coulage du béton liquide, mobilisant alors celui-ci durant ces 24h avant une nouvelle réutilisation. Une production de masse d'éléments de maçonnerie standardisés par moulage sera bien moins efficace que les autres procédés décrits ci-après.

Notons que pour la fabrication d'éléments uniques ou en petites quantités, le procédé par moulage est le plus rentable puisque le coût de réalisation d'un moule est faible (selon son matériau constituant et sa complexité).

### 1.3.3. Fabrication par presse et vibrage

Les photos reprises en Figure 36 ont été prises à l'usine d'Interblocs à Libramont. Elle présente une unité de fabrication par presse-vibrage dont les étapes sont données ci-dessous :

1. Pose du moule, le plus souvent fabriqué en acier, sur la table de presse. Celui-ci est ouvert dans sa partie inférieure et dans sa partie supérieure. Le moule est bien bloqué contre la table pour éviter l'apparition d'espacement entre les deux
2. Descente de la presse et du bac d'alimentation en béton au niveau du moule, de telle sorte que la hauteur entre la table de presse et la presse elle-même soit la même que le bloc voulu
3. Remplissage du moule par le béton
4. Mise en vibration de la table pour répartir le béton dans le moule, tandis que la presse appuie sur la partie supérieure des blocs
5. Remontée de la presse, du bac d'alimentation et du moule : les blocs fabriqués sont alors à l'air libre et tirés hors de la presse par une bande roulante en caoutchouc située dans la table de presse
6. Mise en étuve des blocs durant 24 à 48h pour leur séchage

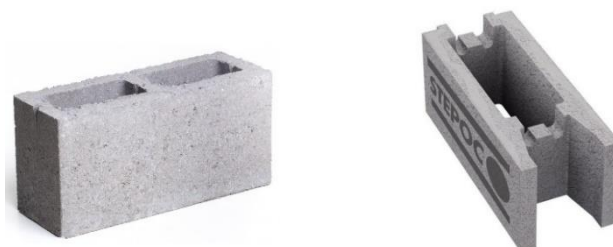


*Figures 36 – Etapes du procédé par presse et vibration*

Il existe de deux types différents d'unité de fabrication de ce type. Un premier type n'utilise pas la mise en vibration de la table : seule la force exercée par la presse répartit le béton dans le moule. La vitesse d'exécution est alors très rapide, les blocs étant coulés/pressés/démoulés en quelques secondes seulement. Le second type couple la vibration permettant la répartition du béton dans le moule et l'application d'une faible pression (typiquement le poids propre du bac d'alimentation) assurant la planéité de la surface de l'élément située dans la partie supérieure du moule.

L'utilisation de béton trop fluide n'est pas possible puisque l'élément doit être suffisamment solide pour tenir debout quelques secondes après avoir été coulé. Il est alors difficile d'obtenir des blocs lisses puisque ce système empêche l'usage de bétons liquides.

Ce procédé est le plus utilisé pour la fabrication industrielle de blocs en béton classiques, de parpaings et de blocs de type stepoc<sup>1</sup> (Figure 37). Il est également adapté à des bétons composés de billes d'Argex.

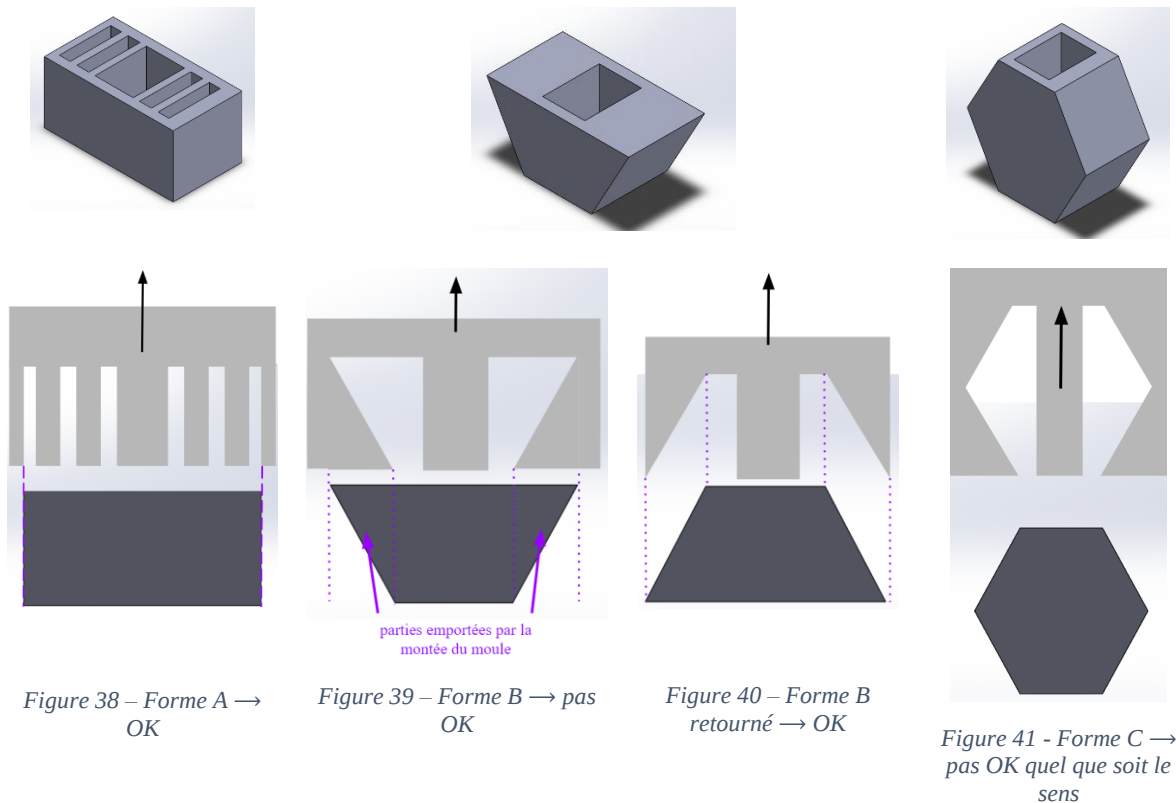


*Figure 37 - Eléments de maçonnerie fabriqués par presse et vibration*

Plusieurs blocs sont fabriqués par passe (Figures 36), permettant une production d'éléments de maçonnerie en grand nombre et à grande vitesse, et réduit donc sensiblement le coût de leur fabrication unitaire.

Les formes des éléments réalisables sont alors plus limitées, puisque le soulèvement vertical du moule libérant les blocs ne doit pas se heurter à une partie des éléments coulés. On peut voir sur les schémas ci-dessous que les faces inclinées dans certains éléments peuvent poser problème et rendre impossible leur fabrication par le procédé (exemples Figures 38 à 41).

<sup>1</sup> Les blocs stepoc sont des blocs agglomérés et creux qui servent alors de coffrage au béton armé qui y est ensuite coulé



#### 1.3.4. Fabrication par extrusion

Le troisième et dernier exemple de procédé de fabrication est l'extrusion. Le procédé se déroule en continu et le mélange passe par les étapes suivantes illustrées par la Figure 42 :

1. Insertion du mélange constitutif dans l'extrudeuse
2. Malaxage du mélange dans l'extrudeuse
3. Poussée du mélange vers la filière en fin d'extrudeuse par une vis sans fin
4. Passage dans la filière dont les contours donne la forme de section des éléments fabriqués
5. Sortie d'un bandeau continu de matière de forme définie par la filière
6. Découpe du bandeau en éléments à l'épaisseur souhaitée par le passage d'un fil métallique
7. Cuisson ou séchage des éléments

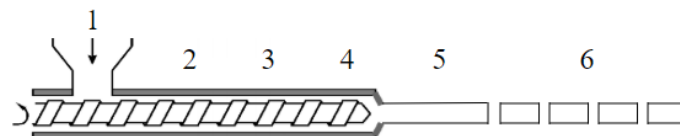


Figure 42 - Extrusion

Seuls des éléments dit « extrudables », c'est-à-dire avec un profil constant sur tout le long d'une de ses directions, peuvent être fabriqués par ce procédé.

La production par extrusion est simple, rapide et peu coûteuse. Plusieurs formes d'éléments peuvent être produites à l'aide d'une seule extrudeuse : il suffit de placer en bout de celle-ci la filière de forme correspondante.

Une fois les blocs découpés à partir du long bandeau de sortie d'extrudeuse, ils peuvent encore subir des modifications, comme il a été constaté dans l'usine Weinerberger de Kortemark visitée. Des rainures fines peuvent ainsi être appliquées sur certaines faces des éléments ou des faibles congés sur leurs angles.

Cette technique est largement utilisée dans la fabrication d'éléments en terre cuite tels que des briques. Avant la cuisson, l'argile est malléable et permet son extrusion, mais suffisamment compacte pour conserver sa forme après la sortie de l'extrudeuse.

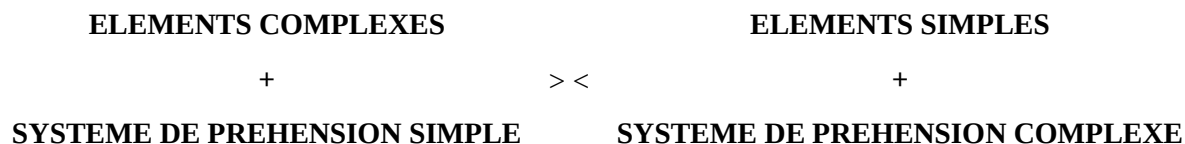
En fait, la fabrication d'éléments en béton avec ce procédé est rendue difficile par la liquidité du béton avant séchage et la présence d'éléments de grandes dimensions dans le mélange (graviers, billes d'Argex). Certaines techniques existent toutefois mais ne sont pas adaptées à la fabrication de petits éléments.

## 1.4. Nouvelle idée et choix d'une typologie d'élément

### 1.4.1. Déplacement de la complexité

#### **Idée du transfert de la complexité**

La réflexion sur une simplification de la forme d'un élément drone-compatible s'est tournée vers une nouvelle idée. Elle sera résumée comme suit, et sera le fondement de toute l'étude qui va suivre. Plutôt que d'imaginer des éléments complexes qui corrigeront l'ensemble des imprécisions de pose grâce à leur forme, l'idée est de concevoir un système de préhension permettant la correction partielle de l'imprécision de pose. Cela va donner lieu à une simplification de la forme des éléments (Figure 43).



*Figure 43 - Idée du transfert de la complexité*

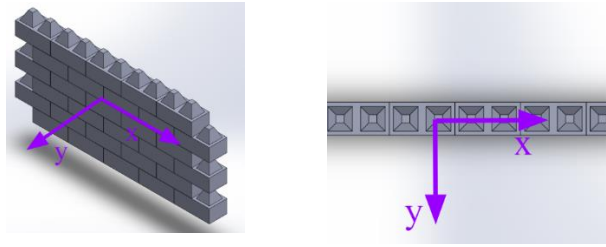
Cette approche déplace la complexité de la forme de l'élément vers le système de préhension. Cela coûte en effet bien moins cher de fabriquer un système de préhension plus sophistiqué, mais capable de placer des centaines voire des milliers de blocs à la forme simple et faciles à fabriquer.

Le développement de ce nouveau type d'éléments devra donc se dérouler en parallèle avec le développement d'un système de préhension complémentaire.

#### **Correction partielle de l'imprécision de pose par le système de préhension**

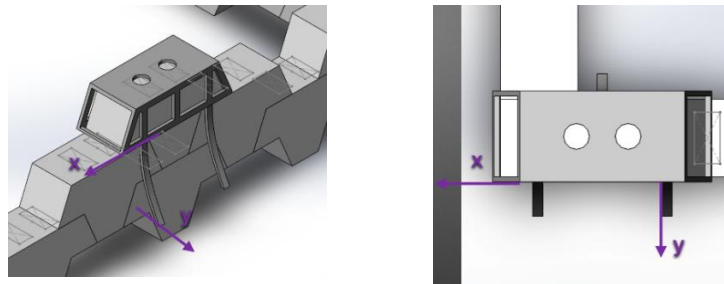
En section 1.1.4, on décrit le système de préhension comme le lien physique entre le drone et l'élément à poser. Le rôle premier de ce système est donc de saisir, prendre (d'où système de préhension) et transporter le bloc. Dans ce qui va suivre, un nouveau rôle va lui être affecté: la correction partielle de l'imprécision de pose du drone. C'est-à-dire guider le bloc lors de sa pose à son emplacement précis voulu. Nous l'appellerons donc "système de préhension et de guidage", en anglais "Gripping and Guiding System" que nous abrègerons par GGS.

Le GGS corrigera partiellement l'imprécision dans une seule direction. Un mur possède 2 directions: la direction parallèle à la direction du mur (x) et celle perpendiculaire à cette direction (y) (Figure 36).



Figures 44 – Directions d'une mur

On constate qu'il est possible de corriger l'imprécision dans la direction y en s'appuyant sur les éléments déjà placés et sur lesquels l'élément va être posé (Figures 37), à l'aide, par exemple, de rails de guidage incorporés au GGS. La forme de l'élément corrigera, elle, l'imprécision dans l'axe x.



Figures 45 - Correction de l'imprécision de pose dans la direction y

Cette nouvelle idée bouleverse complètement la réflexion autour de la forme des éléments drone-compatibles. En transférant ainsi un degré de complexité au système de préhension, les éléments développés pourront voir leur complexité de forme réduite sensiblement.

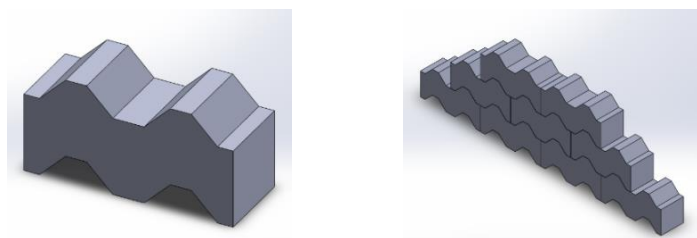
Vu que l'élément doit corriger uniquement l'imprécision de pose dans la direction parallèle au mur, il pourra avoir une forme à la caractéristique très avantageuse: l'élément est extrudable.

## 1.4.2. Développement de formes possibles

Les formes dorénavant possibles sont plus simples et nombreuses. Certaines d'entre elles sont présentées dans cette section, menant ensuite au choix d'une typologie d'élément sur base de leurs avantages et de leurs inconvénients. Cette typologie sera ensuite développée et étudiée dans toute la suite de ce travail.

### 1.4.2.1. DER (Drick Extrudable Rectangular)

La forme du DER reste proche de la forme à profil rectangulaire des éléments de maçonnerie traditionnelle. L'ajout d'extrusion sur la partie supérieure et d'intrusion dans la partie inférieure va permettre l'assemblage des blocs. En y ajoutant des faces inclinées, le bloc pourra corriger l'imprécision de pose dans la direction x. L'élément obtenu et l'assemblage résultant sont illustrés en Figures 46.



Figures 46 - DER

Son avantage est la similarité avec les blocs béton actuels: un profil rectangulaire. Mais comme il a été vu précédemment, cet avantage induit l'inconvénient de l'obstruction en pose par le bloc voisin déjà placé (Figure 47).

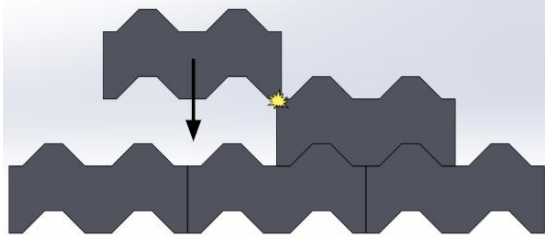


Figure 47 - Obstruction de pose du DER

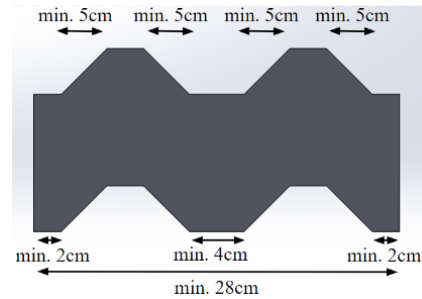
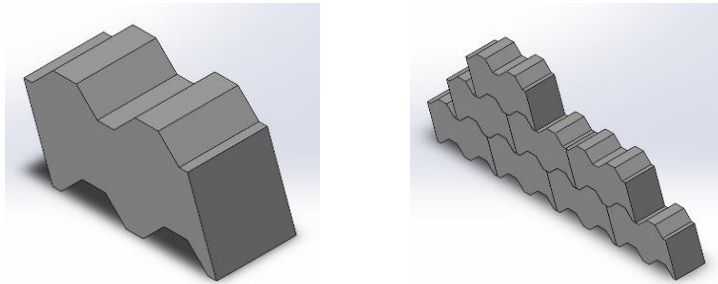


Figure 48 - Longueurs minimales du DER

Autre inconvénient, l'élément devra posséder une longueur minimale pour prévoir les 4 plans inclinés de glissement nécessaires à la correction de l'imprécision de pose établie de 5 cm (et donc de minimum 20 cm auxquels s'ajoutent une dizaine de cm pour éviter des arêtes à épaisseur nulle) (Figure 48).

#### 1.4.2.2. DEP (Drick Extrudable Parallelogram)

Pour éviter l'obstruction du bloc en pose par son voisin, le DEP a été imaginé. Sa forme possède un profil en parallélogramme. L'élément obtenu et l'assemblage résultant sont illustrés en Figures 49.



Figures 49 - DEP

L'inconvénient est double: ses faces inclinées compliquent la construction de coins, et les blocs devront être placés dans un ordre précis. Pour fermer un étage de blocs, l'élément (a) doit être mise en place après l'élément (b), mais c'est impossible (Figure 50). Cela posera problème dans la construction de bâtiment fermé.

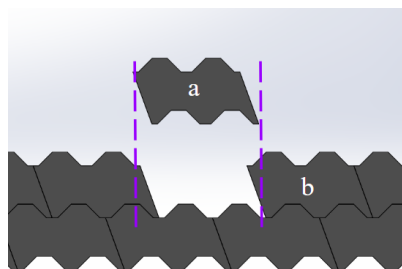


Figure 50 - Importance de l'ordre de pose

L'inconvénient de la longueur minimale mentionné dans la section 1.3.2.1 concerne également le DEP.

#### 1.4.2.3. DET (Drick Extrudable Trapezoidal)

Le DET a une forme au profil trapézoïdal. Cette solution est en fait une combinaison du DET1 et du DET2, qui doivent être mis en place par alternance (Figures 51 et Figure 52).

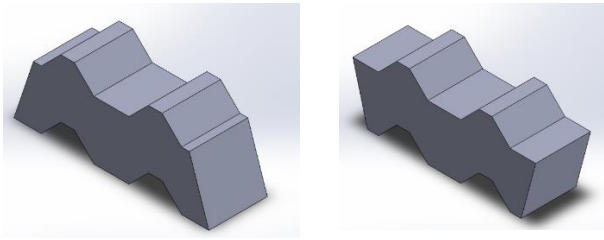


Figure 51 - DET1 et DET2

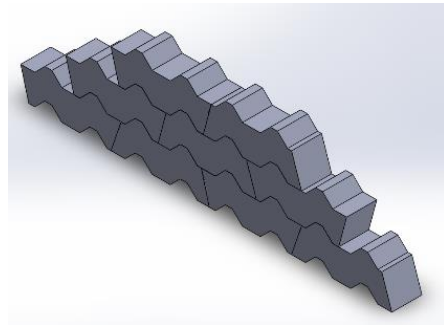


Figure 52 - Mur de DET1 et DET2 alternés

Premier inconvénient, un ordre précis de pose doit alors être établi: pour constituer un étage de maçonnerie, les DET1 sont placés en premier, dans lesquels viennent s'emboîter les DET2 placés ensuite. Le second inconvénient apparaît lorsqu'on envisage d'intégrer de tels blocs dans des coins. Le nombre de blocs dérivés pour y parvenir gonfle très vite. Et si on veut que les éléments dérivés gardent une forme extrudable, la seule solution est de retirer les extrusions et intrusions dans la partie du coin lui-même, diminuant la cohésion du mur établi.

#### 1.4.2.4. DEPT (Drick Extrudable Progressive Triangular)

Pour imaginer le DEPT, il a fallu s'inspirer des Droxels-R ou Dricks Progressive présentés en section 2.2.1. En effet, pour pallier aux inconvénients des éléments donnés ci-dessus, il faut envisager une construction progressive de chaque étage, c'est-à-dire de construire chaque étage de blocs en 2 phases, comme expliqué dans la section consacrée aux Droxels-R: *“Lors de l'assemblage de ces éléments pour former un mur, un étage complet de blocs est rempli en 2 phases. La phase de pose des blocs (a) sur la Figure 31 remplit partiellement l'étage encadré, après quoi la phase de pose des blocs (b) complète l'étage. La composition d'un étage sera donc progressive, d'où l'appellation drick progressif.”* (section 1.1.2).

C'est sur cette base que le Drick Extrudable Progressive Triangular ou DEPT a été imaginé. Il combine l'avantage des droxels-R ou dricks progressives et celui du caractère extrudable des éléments développés dans cette section. Est obtenu un élément au profil triangulaire, complété de faces inclinées pour corriger l'imprécision de pose dans la direction x (Figure 53 et Figure 54).

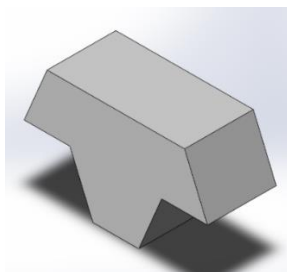


Figure 53 - DEPT

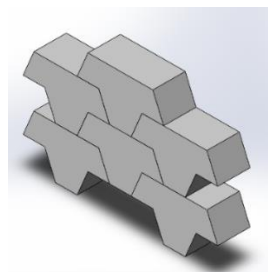


Figure 54 - Mur de DEPT

Les avantages de cette typologie d'élément sont nombreux. Premièrement, un mur se compose uniquement de DEPT, contrairement au cas des DET1 et DET2. Deuxièmement, la composition de coin nécessite la création d'un seul dérivé (Figure 55 et Figure 56). Il en est de même pour la jonction d'un

mur à un autre (Figure 57 et Figure 58). Troisièmement, un moule expérimental de DEPT est simple à fabriquer puisque le bloc ne possède que 8 faces transversales, contre 20 pour le DEP par exemple. Cela constitue un nouvel avantage certes secondaire mais important à court terme pour le coulage de blocs de test. D'autres avantages du DEPT seront décrits dans la prochaine section.

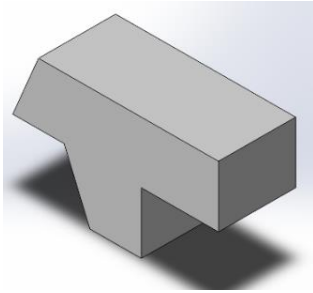


Figure 55 - DEPT de coin

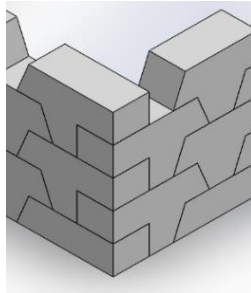


Figure 56 - Coin en DEPT

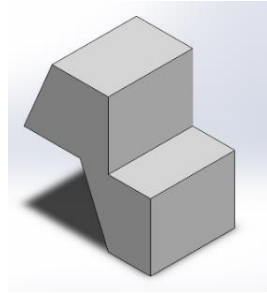


Figure 57 - DEPT de jonction

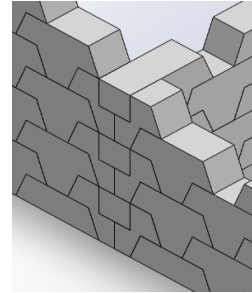


Figure 58 - Jonction de mur en DEPT

#### 1.4.2.4. Conclusion

Un lecteur avisé constatera que le dernier élément présenté comporte des avantages plus importants que les autres proposés. Au vu de tous ses points forts et l'absence d'inconvénients importants, le DEPT s'impose comme la forme à étudier dans le cadre d'une recherche et développement d'un élément de maçonnerie drone-compatible industrialisable.

### 1.4.3. Avantages et adaptation du système constructif

#### 1.4.3.1. Avantages du DEPT

Dans la section qui précède, le DEPT a été choisi en raison de ses nombreux atouts. Ceux-ci sont résumés ci-dessous, auxquels d'autres avantages notables s'ajoutent.

- respect du cahier des charges imposé à un élément drone-compatible, détaillé en section 1.1;
- simplicité de forme et donc de fabrication, moule facile à réaliser pour le coulage de premiers blocs de test;
- construction progressive de chaque étage, en deux étapes, évitant l'obstruction de la pose d'un bloc par son voisin;
- dimensions et proportions adaptables en fonction de l'épaisseur du bloc demandé, de la charge utile du drone ou encore de la hauteur de chaque étage de blocs;
- application de mortier-colle entre les blocs facile (voir section 1.4.3.3);
- éléments dérivés permettant la réalisation de coin, de jonction de 3 ou 4 murs ou de linteaux peu nombreux et toujours de formes simples et extrudables;
- stabilité en stockage, à condition de donner une dimension suffisante à la face inférieure.

#### 1.4.3.2. Système de préhension et de guidage (GGS)

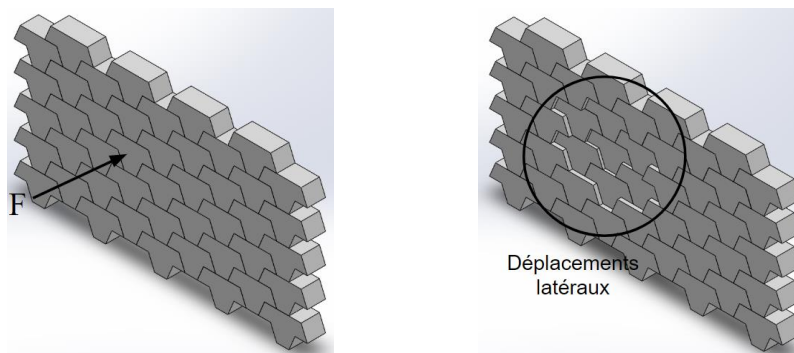
Pour rendre possible la construction de murs en DEPT, il est indispensable de concevoir un système de préhension et de guidage adapté. Le GGS (pour « Gripping and Guiding System ») sera un élément plus complexe que ceux imaginés pour les autres éléments développés par le passé puisqu'il aura le rôle supplémentaire de corriger l'imprécision de pose dans la direction perpendiculaire au mur.

Un rôle supplémentaire puisqu'il s'ajoute à celui de saisir et déposer les éléments et d'assurer la connexion drone-bloc en vol.

Des solutions au développement d'un GGS fonctionnel et adapté seront présentées dans le Chapitre 3.

#### 1.4.3.3. Risque de déplacement latéral et utilisation de mortier-colle

De par leur forme extrudable et le fait qu'aucun mortier n'est appliqué dans le système constructif drone-compatible, les DEPT assemblés sont sujets au glissement latéral. Une fois le bâtiment construit, le moindre choc latéral au mur pourrait entraîner des déplacements inacceptables de certains blocs (Figures 59).



Figures 59 - Déplacement latéral d'un mur de DEPT soumis à une force latérale

Pour parer cette éventualité, il serait intéressant d'envisager l'application de mortier-colle entre les blocs au fur et à mesure de la construction. Le mortier-colle est une préparation à base de ciment, de sable très fin, d'eau et d'adjuvants fixatifs, et possède donc de bonnes caractéristiques adhésives. Initialement utilisé dans la pose de carrelages, celui-ci est depuis quelques années utilisé dans la construction du gros-œuvre, en substitut du mortier traditionnel.

Pour l'instant, il existe dans la littérature peu d'exemples de l'utilisation de ce matériau dans la construction extérieure et l'assemblage de blocs de béton. Cependant, une entreprise belge a déjà mis sur le marché une technologie combinée de blocs de béton lisses aux dimensions strictes et d'un mortier-colle adapté.

Béton de la Lomme basé à Rochefort, commercialise depuis 2010 une nouvelle gamme de « blocs calibrés par fraisage » permettant une nouvelle maçonnerie dite « ciment-collée à joints très minces » (8). La mise en place du mortier-colle utilisé consiste alors à faire glisser sur l'étagé de blocs inférieurs un bac-distributeur, déposant 2 bandes régulières (Figure 60). Il ne reste ensuite qu'à déposer le bloc à son emplacement (Figures 61).



Figure 60 - Dépôt de mortier-colle par glissement de bac-distributeur



Figures 61 - Mise en place des blocs rapide et sans pression verticale

Le mortier-colle permet d'obtenir des joints très fins et sa mise en œuvre est plus rapide et simple que pour le mortier classique (Figures 62).



*Figures 62 - Montage de blocs par mortier-colle et joints fins obtenus*

L'avantage du mortier-colle et sa complémentarité avec le système constructif drone-compatible réside dans ces deux points:

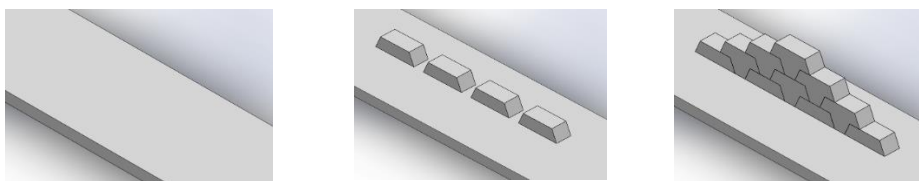
- sa mise en œuvre peut être envisagé par automatisation en utilisant des robots capables d'appliquer le mortier-colle sur les DEPT déjà posés, ou plus simplement sur les DEPT avant d'être emmenés sur son emplacement de pose
- sa couche nécessaire à assurer la cohésion est mince, permettant à la fois de corriger légèrement les imperfections dimensionnelles de fabrication des DEPT, sans pour autant obstruer leur pose

L'application de mortier-colle entre les DEPT permettra à la fois:

- d'obtenir des murs résistants aux efforts et chocs latéraux;
- d'assurer une meilleure cohésion globale des murs de DEPT;
- de par ses caractéristiques lubrifiantes avant séchage, d'améliorer le glissement entre le DEPT en phase de pose et les DEPT inférieurs;
- d'assurer l'étanchéité à l'air et à l'eau des murs;
- de corriger les imperfections dimensionnelles de fabrication des blocs.

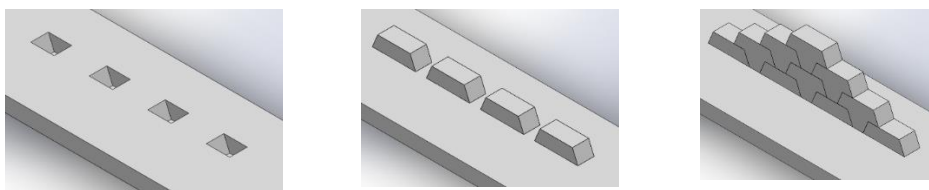
#### 1.4.3.4. Fondations

Une autre question qui se pose face à l'utilisation de DEPT pour la construction de bâtiment : les fondations. Pour commencer l'élévation d'un mur, il est possible de fonder la construction sur une simple dalle plane et y ajouter des dérivés du DEPT (section 2.5.1) directement solidarisés à cette dalle de fondation (Figures 63).



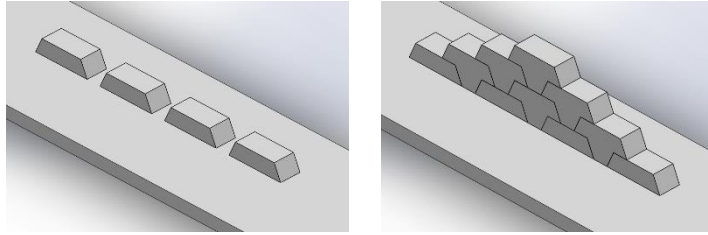
*Figures 63 - Fondations par ajout de DEPT dérivés*

Une autre solution serait de directement couler la dalle de fondation tout en y ajoutant des coffrages pour obtenir une dalle munie de trous qui accueilleront les blocs de la première couche (Figures 64).



*Figures 64 - Fondations par dalle trouée*

La dernière solution est d'ancrer directement dans la dalle des DEPT, dont les parties supérieures alors hors de la dalle, permettront d'accueillir le premier étage de DEPT (Figures 65). Ceux-ci pourront être directement posés par drone, contrairement aux deux exemples précédents nécessitant une pose manuelle soit des DEPT dérivés de base, soit de DEPT dans les inclusions prévues dans la dalle.



*Figures 65 - Fondations par DEPT ancrés*

# Chapitre 2: Développement du DEPT (Drick Extrudable Progressive Triangular)



Après le choix du Drick Extrudable Progressive Triangular (DEPT) comme typologie idéale d'éléments de maçonnerie drone-compatibles industrialisables dans le chapitre précédent, ce deuxième chapitre concerne l'étude propre de cette typologie.

Le modèle de départ sera décrit avec toutes ses caractéristiques pour illustrer au mieux la forme et le système imaginé. Une étude paramétrique sera ensuite réalisée; elle permettra de donner au DEPT les proportions et dimensions optimales en fonction du mur demandé, de la charge utile du drone, de l'imprécision de pose du drone et d'autres paramètres extérieurs.

La section suivante présentera des solutions possibles afin de réduire le poids des DEPT.

Sur base de ces études et des paramètres imposés en laboratoire, un modèle d'essai sera alors choisi et deviendra la base d'essais grandeur nature décrits dans le chapitre 4.

Ensuite seront présentés un ensemble de dérivés du DEPT, qui permettront la réalisation de construction de type maisons unifamiliales par la technologie du DEPT et son GGS associé.

Une dernière section clôturera ce chapitre en décrivant les procédés de fabrication permettant la fabrication à grande échelle du DEPT et de ses dérivés, afin d'en déterminer son potentiel « industrialisable ».

## 2.1. Modèle de départ

Le DEPT est donc un élément extrudable à profil triangulaire, permettant ainsi une construction dite progressive de chaque étage de blocs. Les faces transversales sont inclinées pour corriger l'imprécision de pose du drone dans la direction parallèle au mur.

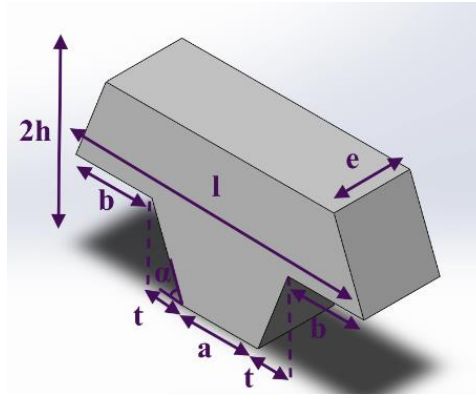
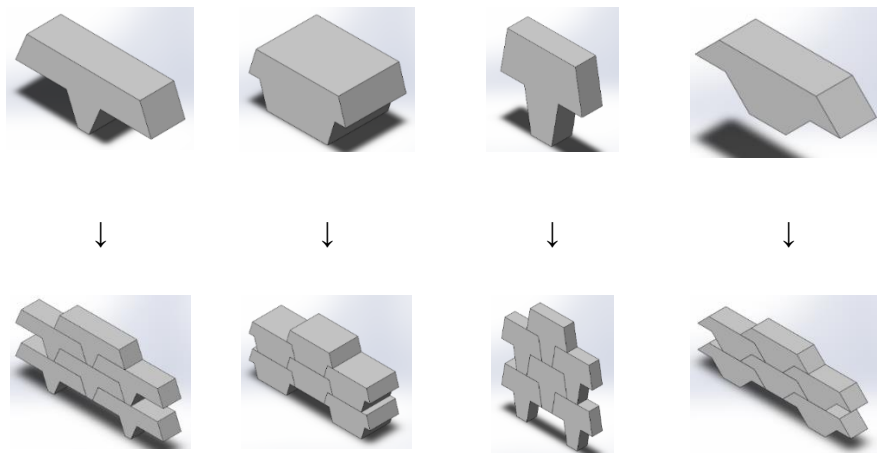


Figure 66 - Forme et dimensions du DEPT

Ses dimensions sont reprises sur la Figure 66 :

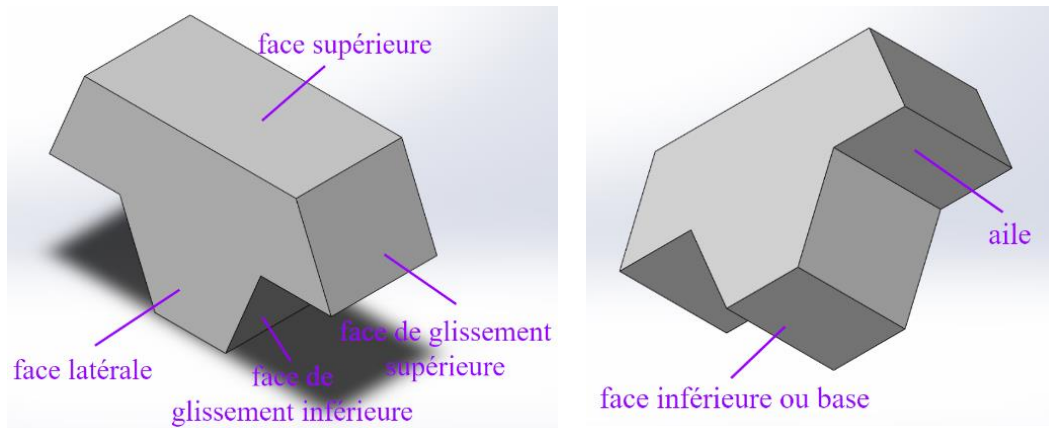
- l'épaisseur  $e$  correspond à l'épaisseur du mur définie par l'utilisateur;
- la hauteur  $h$  correspond à la hauteur d'un étage de blocs, et donc à la demi hauteur du bloc complet;
- l'angle de glissement  $\alpha$ , l'angle des faces inclinées avec l'horizontale;
- la longueur  $l$  correspond à la longueur totale du bloc;
- la longueur de la base  $a$  est une dimension à déterminer en fonction des paramètres extérieurs;
- la tolérance  $t$ , correspond à la valeur de l'imprécision de pose du drone;
- la longueur des ailes  $b$  résulte du choix de  $l$ ,  $a$  et  $t$ .

La plupart de ces dimensions sont déterminées sur base du mur demandé, des paramètres extérieurs et de choix constructifs. L'avantage de cette typologie d'éléments est la possibilité de faire varier toutes ces dimensions, multipliant à l'infini les possibilités de formes, tout en obtenant toujours des éléments fonctionnels et assemblables (Figures 67).



Figures 67 - Exemples de DEPT aux dimensions variables

Dans la suite de ce travail, des appellations seront utilisées pour décrire les phénomènes et interactions existants entre les faces des DEPT et sont résumés ci-dessous (Figures 68).



Figures 68 - Dénominations utilisées pour les faces du DEPT

Ce modèle de départ va faire l'objet de modifications qui résultent de conclusions d'essais et de la volonté d'obtenir un élément encore plus fonctionnel et efficace. L'objectif étant d'obtenir un modèle d'essais qui permettra de valider la typologie DEPT lors d'essais en dimensions et conditions réelles en laboratoire et avec drone. D'autres modifications seront également apportées lors du développement de GGS compatibles dans le chapitre suivant.

## 2.2. Etude paramétrique

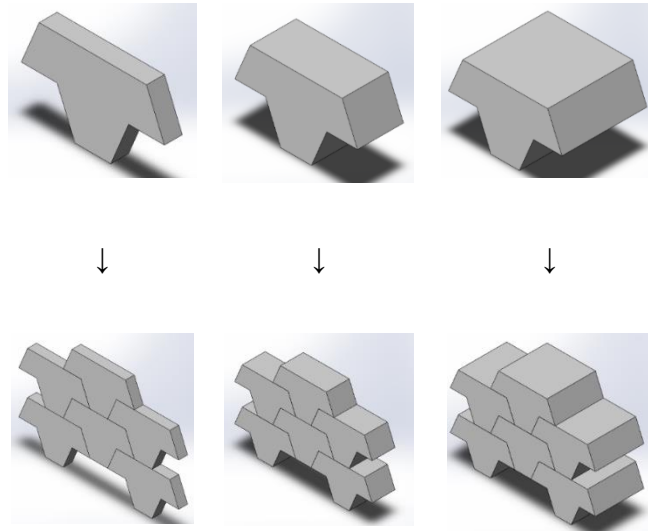
### 2.2.1. Objectif

Comme dit précédemment, toutes les dimensions et proportions du DEPT peuvent être modifiées, tout en obtenant un élément fonctionnel et assemblable, même si certaines limites existent. Le choix réfléchi de ces dimensions va permettre d'obtenir un élément plus efficace et ergonomique. Cette section présentera les rôles et les contraintes de chaque dimension du DEPT, et le raisonnement suivi pour en obtenir les dimensions optimales.

### 2.2.2. Description des dimensions

#### 2.2.2.1. L'épaisseur $e$

L'épaisseur  $e$  du DEPT est en fait sa profondeur d'extrusion, et est donc constant sur tout son profil. Le choix de cette dimension est très libre: l'augmentation ou la diminution de l'épaisseur n'induit pas une modification des autres dimensions (si on ne tient pas encore compte d'une limite du poids du bloc) (Figures 69).



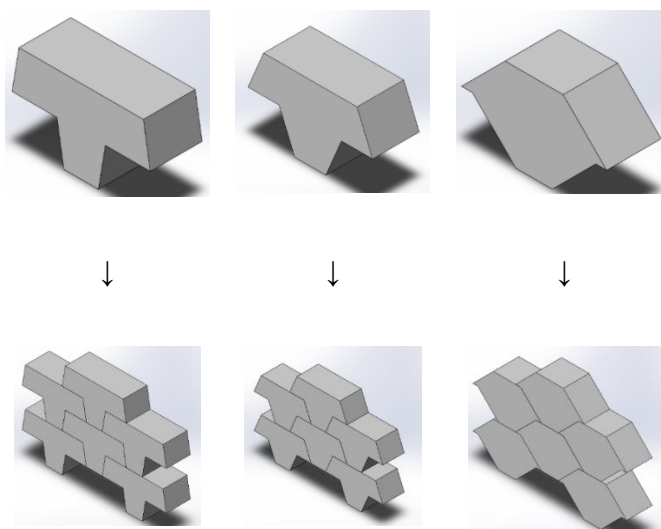
*Figures 69 - Exemples de DEPT à épaisseur  $e$  variable*

Le choix de  $e$  aura uniquement une influence sur le poids de chaque élément et sur l'épaisseur du mur construit. C'est donc l'utilisateur du bloc qui aura la décision à prendre sur l'épaisseur qu'il souhaite donner au mur qu'il construira avec les DEPT.

#### 2.2.2.2. La tolérance $t$

Comme expliqué en section 1.1.3, la forme d'un élément de maçonnerie drone-compatible est pensée afin de pouvoir reprendre l'imprécision de sa pose par un drone. Dans le système DEPT et son GGS associé, cette imprécision est corrigée dans la direction perpendiculaire au mur par le système de guidage incorporé au GGS, et dans la direction parallèle au mur par les faces inclinées qui composent l'élément. Chaque face inclinée (ou face de glissement) possède une dimension longitudinale qu'est la tolérance  $t$ , qui correspond donc à la valeur de l'imprécision de pose que l'élément doit corriger.

La valeur de  $t$  influence directement les dimensions  $a$ ,  $b$  et  $l$  qui seront décrites plus bas et la forme du bloc. En effet, on peut voir sur les exemples en Figures 70 que, pour des mêmes valeurs de  $l$  et  $a$ , une tolérance élevée mène à une dimension de l'aile  $b$  faible. Inversement, une tolérance faible mène elle à une valeur de  $b$  élevée.



*Figures 70 - Exemples de DEPT à tolérance variable*

Puisque la valeur de la tolérance correspond à celle de l'imprécision de pose, c'est la technologie de guidage du drone et les contraintes extérieures qui vont mener à fixer une valeur de la tolérance minimale (section 1.1.3.). Rien n'empêche cependant d'augmenter cette dimension dans le choix des dimensions du DEPT utilisé: si l'élément peut reprendre une plus grande imprécision de pose, il reste fonctionnel.

### 2.2.2.3. L'angle de glissement $\alpha$

L'angle de glissement est la valeur de l'inclinaison des faces inclinées par rapport à l'horizontale. Cet angle est le même pour les faces inclinées situées dans le bas de l'élément (a) et celles situées dans le haut des éléments (b) (Figure 71). Les faces (c) doivent glisser sur les faces (d) lors de la mise en place d'un nouveau DEPT. L'inclinaison de celles-ci doit être choisie pour assurer le bon glissement et éviter le blocage par frottement de l'élément en cours de pose. Il faut donc déterminer le coefficient de frottement de ces faces inclinées pour déterminer l'angle minimum à leur prescrire.

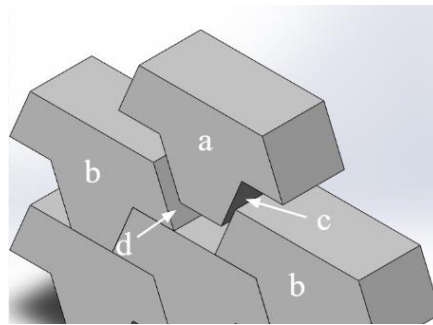


Figure 71- Fonctionnement des faces inclinées du DEPT

Un test a été effectué sur les premiers DEPT fabriqués en laboratoire. Le coefficient de frottement a été mesuré entre deux faces latérales, la qualité de leur surface étant la même que celle des faces de glissement (Figure 72).



Figure 72 - Essai de détermination du coefficient de frottement

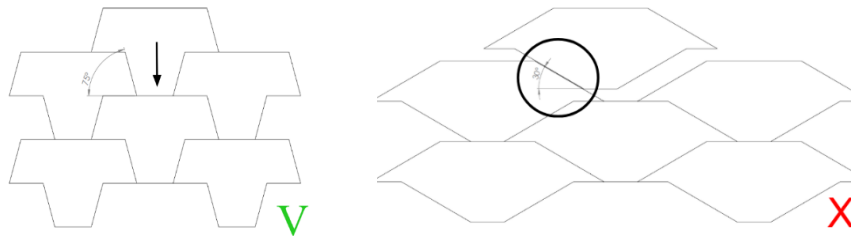
Les détails et résultats de cet essai sont disponibles en Annexe A.1. Le coefficient de frottement obtenu s'établit entre 0,60 et 0,65, restant proche des valeurs mentionnées dans la littérature. On en obtient la valeur de l'angle de frottement  $\alpha_f$ .

$$\alpha_f = \arctg(0,60 \dots 0,65) = 30,96 \dots 33,02^\circ \approx 30^\circ$$

$$\alpha_{min} = \alpha_f$$

En fait, l'angle de glissement du DEPT doit être supérieur à cet angle de frottement pour éviter le blocage d'un élément en cours de pose (Figures 73). Il est donc prudent de fixer l'angle de glissement  $\alpha$  avec une marge de sécurité.

$$\alpha > \alpha_{min}$$



Figures 73 - Angle de glissement

La valeur de  $\alpha$  déterminée ici est celle d'un DEPT comprenant une qualité de surface équivalente à celle des blocs utilisés pour l'essai. Cet angle doit être réévalué en cas d'utilisation de nouveaux matériaux (en céramique par exemple) et en cas d'une qualité de surface différente.

Le choix de la valeur de  $\alpha$  d'un DEPT se fait donc en fonction du type de matériau choisi et de l'état de surface obtenu par le fabricant.

#### 2.2.2.4. La hauteur h

Il ne faut pas confondre la hauteur h décrite ici et la hauteur totale du bloc 2h. La hauteur h correspond à la hauteur d'un étage de bloc (Figure 74).

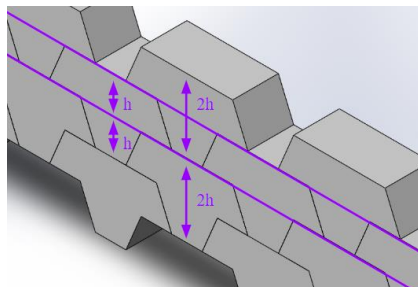


Figure 74 - Définition de h

Fixer la valeur de h nécessite la prise en compte de plusieurs facteurs, étant donné qu'elle influence fortement les autres dimensions du DEPT et sa stabilité

La détermination de la valeur de h aura une conséquence sur l'élancement du bloc et le nombre d'étages de blocs composant un mur. De plus, plus le bloc est grand, plus le GGS correspondant sera encombrant et lourd (voir section 3.3).

##### 2.2.2.4.1. Calcul de $h_{min}$

Il existe 3 valeurs minimales de h, et la plus faible d'entre elles constituera la limite inférieure de la valeur à affecter au DEPT:

- la hauteur minimale  $h_{min,frot}$  déterminée à l'aide de l'angle  $\alpha$  et de la tolérance t;
- la hauteur minimale  $h_{min,imp,lat}$  déterminée sur base de l'imprécision de pose latérale;
- la hauteur minimale  $h_{min,imp,ang}$  déterminée sur base de l'imprécision dimensionnelle angulaire du DEPT.

### Calcul de $h_{min,frot}$

On constate dans un premier temps qu'une hauteur minimale est nécessaire pour donner au DEPT une tolérance  $t$  suffisante ou supérieure à celle qui lui a été affectée. Puisqu'on fixe d'abord  $t$  qui dépend de la précision du drone et  $\alpha$  qui dépend du matériau, si la hauteur  $h$  est trop faible et l'angle  $\alpha$  choisi est élevé, la tolérance atteinte sera trop faible (Figure 75).

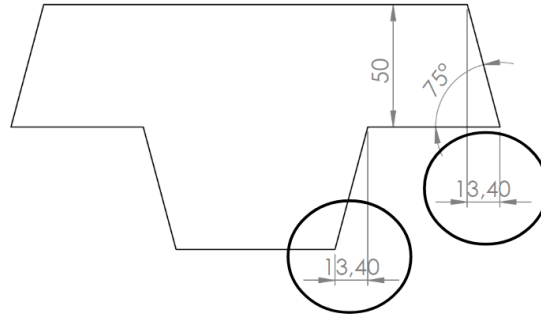


Figure 75 - Tolérance insuffisante (si on exige 50mm) obtenue avec un angle de glissement fixée à 75° et une hauteur fixée à 50mm

La valeur minimale de la hauteur  $h$  est facile à déterminer par l'équation suivante:

$$tg(\alpha) = \frac{h_{min,frot}}{t} \Leftrightarrow h_{min,frot} = t * tg(\alpha)$$

### Calcul de $h_{min,imp\_lat}$

Lors de la construction par drone d'un mur de DEPT, il est quasiment impossible d'obtenir un parfait positionnement latéral (Figure 76). Ce constat sera étudié et décrit en section 5.2. Le système de guidage latéral et l'imprécision sur la dimension  $e$  des DEPT donne lieu lors de la pose à une imprécision latérale de positionnement. Une valeur plafond de cette imprécision peut être déterminé et correspond au degré de précision de pose combiné du système DEPT et GGS associé  $\delta_{l,max}$ .

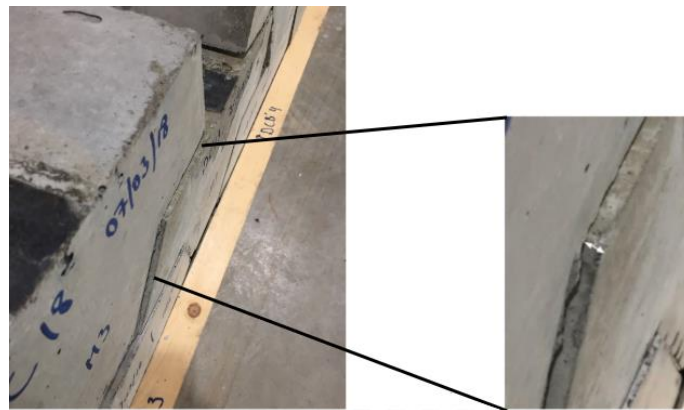


Figure 76 - Imprécision latérale de pose

Le cumul de toutes ces imprécisions étage après étage de DEPT mène alors à un décalage de la position latérale du sommet du mur par rapport à sa position désirée. Une valeur maximale  $\delta_{l,limite}$  est définie comme le décalage maximal au sommet à ne pas dépasser lors de la construction du mur.

Si on considère le pire des cas, toutes les imprécisions de pose seront dans la même direction et avec une valeur égale à la valeur plafond  $\delta_{l,max}$  (Figure 69). Le décalage total au sommet du mur vaudra alors cette valeur plafond multipliée par le nombre d'étages de DEPT qui composent le mur, et doit être inférieure à la valeur maximale  $\delta_{l,limite}$  exigée:

$$\delta_{l,tot} = n^{bres}(DEPT) * \delta_{l,max} < \delta_{l,limite} \quad (1)$$

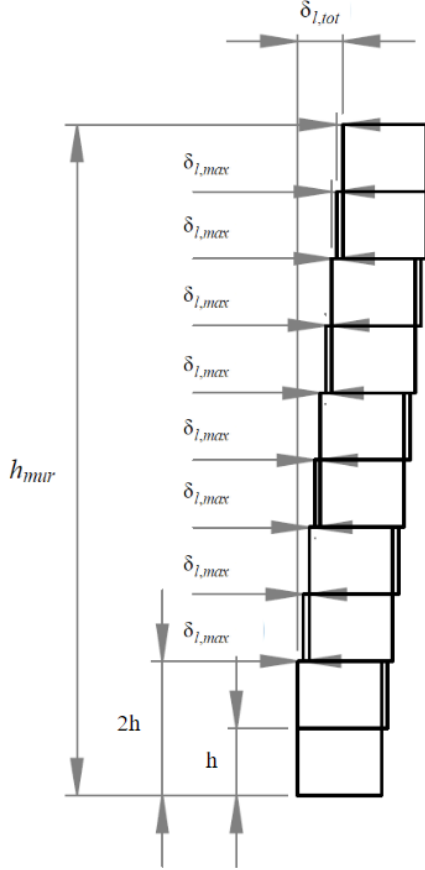


Figure 77 - Schéma de l'amplification du décalage latérale

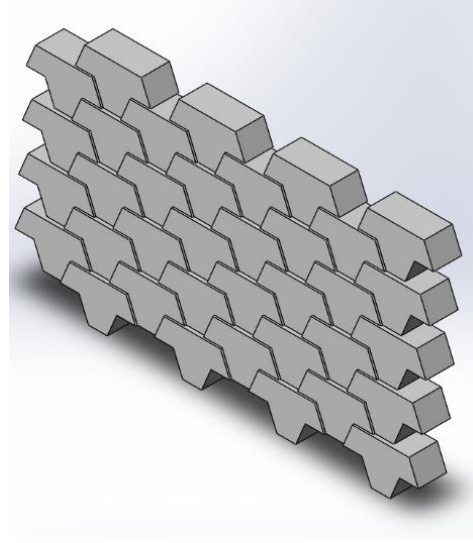


Figure 78 - Mur de DEPT avec décalage latéral de pose

Le degré de précision du système DEPT/GGS associé étant défini et difficile à réduire, il faut diminuer le nombre d'étage de DEPT composant le mur pour rester sous la valeur maximale de décalage du mur. Or plus  $h$  est grand, moins ce nombre est élevé. C'est comme cela qu'il est possible de calculer une hauteur minimale de bloc sur base de la hauteur du mur à construire  $h_{mur}$ , le degré de précision de pose du système DEPT et GGS associé  $\delta_{l,max}$  et la valeur maximale du décalage de mur exigé  $\delta_{l,limite}$  (le coefficient 2 provient du fait que le bloc ait une hauteur totale valant  $2h$ ):

$$2h * n^{bres}(DEPT) = h_{mur} \quad (2)$$

$$(1) \text{ et } (2) \Rightarrow h_{min,imp\_lat} = \frac{h_{mur} * \delta_{l,max}}{2 * \delta_{l,limite}}$$

La valeur obtenue est la valeur minimale de la hauteur du DEPT. En effet, si la hauteur diminue, le nombre de blocs augmente et donc l'imprécision totale est plus élevée.

$$h > h_{min,imp\_lat}$$

### Calcul de $h_{min,imp\_ang}$

En plus d'une imprécision latérale de pose du DEPT, il apparaît également une imprécision angulaire: la face supérieure du DEPT posé n'est pas parfaitement parallèle à l'horizontale. Cela est dû soit à l'imprécision du bloc lors de sa fabrication, soit à la présence d'éléments parasites entre le DEPT posé et les deux autres sur lequel il s'assemble. Cette imprécision angulaire peut être estimée après plusieurs essais et en fonction de la précision de la production des DEPT. Elle sera noté  $\theta_{l,max}$  et s'exprime en degré.

Cette imprécision va entraîner une déformation du mur menant à un décalage du positionnement du sommet du mur. Le phénomène va s'amplifier étage après étage (Figure 79). On visera, comme précédemment, à ne pas dépasser la valeur maximale du décalage de mur  $\delta_{l,limite}$ .

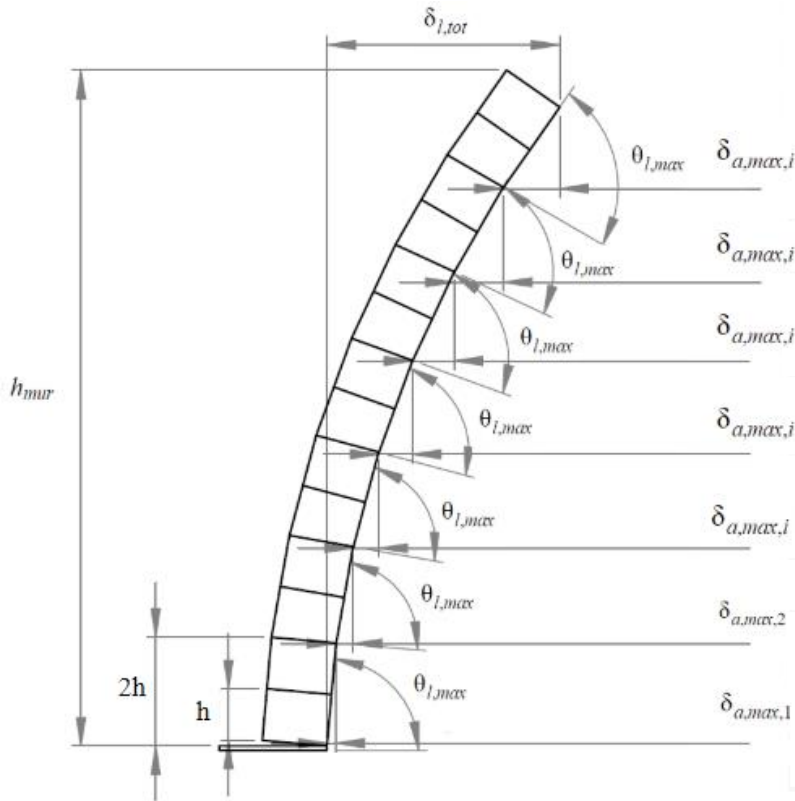


Figure 79 - Schéma de l'amplification du décalage angulaire

Obtenons d'abord l'expression de ce décalage total au sommet, dépendant de  $h$  et l'imprécision angulaire  $\theta_{l,max}$ . On étudie ici le pire des cas, c'est-à-dire que l'imprécision angulaire maximale sera atteinte pour tous les blocs composants le mur et dans la même direction. Au premier étage de blocs, on a donc:

$$\delta_{a,max,1} = \frac{2h}{tg(90^\circ - \theta_{l,max})}$$

Au second,

$$\delta_{a,max,2} = \frac{2h}{tg(90^\circ - 2 * \theta_{l,max})}$$

Et ainsi de suite:

$$\delta_{a,max,n} = \frac{2h}{tg(90^\circ - n * \theta_{l,max})}$$

Ces décalages s'additionnent ensuite étage de blocs après étage de blocs:

$$\delta_{a,max,tot,1} = \delta_{a,max,1} = \frac{2h}{tg(90^\circ - \theta_{l,max})}$$

$$\delta_{a,max,tot,2} = \delta_{a,max,1} + \delta_{a,max,2} = \frac{2h}{tg(90^\circ - \theta_{l,max})} + \frac{2h}{tg(90^\circ - 2 * \theta_{l,max})}$$

On obtient alors une expression du décalage total:

$$\begin{aligned} \delta_{a,max,tot,n} &= \frac{2h}{tg(90^\circ - \theta_{l,max})} + \frac{2h}{tg(90^\circ - 2 * \theta_{l,max})} + \dots + \frac{2h}{tg(90^\circ - n * \theta_{l,max})} \\ &= 2h * \left( \frac{1}{cotg(\theta_{l,max})} + \frac{1}{cotg(2\theta_{l,max})} + \dots + \frac{1}{cotg(n\theta_{l,max})} \right) \end{aligned}$$

Qui doit rester inférieur à la valeur exigée  $\delta_{l,limite}$  :

$$\delta_{a,max,tot,n} < \delta_{l,limite}$$

Il est alors possible, sur base de la valeur de l'imprécision angulaire  $\theta_{l,max}$ , de la hauteur du mur  $h_{mur}$  et de la valeur maximale de décalage exigée  $\delta_{l,limite}$ , de déterminer une valeur minimale de la hauteur de bloc  $h_{min,imp\_ang}$ .

Dans le fichier Excel disponible en annexe A.2, on recherche cette valeur de  $h_{min,imp\_lat}$  en fixant tout d'abord le nombre de DEPT placés par étage. D'où découle la hauteur du DEPT  $h_{choisi}$ ; grâce à quoi on peut calculer  $\delta_{a,max,tot,n}$  avec  $\theta_{l,max}$  et  $h_{choisi}$ .

L'opération est répétée pour chaque hauteur possible du DEPT et on obtient un tableau reprenant le décalage maximal obtenu pour chaque hauteur possible. La plus petite de ces valeurs qui entraîne un décalage respectant  $\delta_{a,max,tot,n} < \delta_{l,limite}$  est donc  $h_{min,imp\_ang}$  (Figure 80).

| nbres blocs | h     | delta/2h | delta_tot/2h | delta_tot |
|-------------|-------|----------|--------------|-----------|
| 1           | 1,500 | 0,008727 | 0,0087       | 0,02618   |
| 2           | 0,750 | 0,017455 | 0,0262       | 0,03927   |
| 3           | 0,500 | 0,026186 | 0,0524       | 0,05237   |
| 4           | 0,375 | 0,034921 | 0,0873       | 0,06547   |
| 5           | 0,300 | 0,043661 | 0,1310       | 0,07857   |
| 6           | 0,250 | 0,052408 | 0,1834       | 0,09168   |
| 7           | 0,214 | 0,061163 | 0,2445       | 0,10480   |
| 8           | 0,188 | 0,069927 | 0,2533       | 0,09498   |
| 9           | 0,167 | 0,078702 | 0,3320       | 0,11066   |
| 10          | 0,150 | 0,087489 | 0,4195       | 0,12584   |
| 11          | 0,136 | 0,096289 | 0,5158       | 0,14066   |
| 12          | 0,125 | 0,105105 | 0,6209       | 0,15522   |
| 13          | 0,115 | 0,113936 | 0,6297       | 0,14532   |
| 14          | 0,107 | 0,122785 | 0,7525       | 0,16125   |
| 15          | 0,100 | 0,131653 | 0,8841       | 0,17683   |
| 16          | 0,094 | 0,140541 | 1,0247       | 0,19213   |
| 17          | 0,088 | 0,149451 | 1,0336       | 0,18240   |
| 18          | 0,083 | 0,158385 | 1,1920       | 0,19866   |
| 19          | 0,079 | 0,167343 | 1,3593       | 0,21463   |
| 20          | 0,075 | 0,176327 | 1,5356       | 0,23035   |
| 21          | 0,071 | 0,185339 | 1,7210       | 0,24586   |
| 22          | 0,068 | 0,194381 | 1,9154       | 0,26119   |
| 23          | 0,065 | 0,203453 | 2,1188       | 0,27637   |
| 24          | 0,063 | 0,212557 | 2,3314       | 0,29142   |
| 25          | 0,060 | 0,221695 | 2,5531       | 0,30637   |
| 26          | 0,058 | 0,230868 | 2,7839       | 0,32122   |
| 27          | 0,056 | 0,240079 | 3,0240       | 0,33600   |
| 28          | 0,054 | 0,249328 | 3,2733       | 0,35072   |
| 29          | 0,052 | 0,258618 | 3,5320       | 0,36538   |
| 30          | 0,050 | 0,267949 | 3,7999       | 0,37999   |

Figure 80 - Exemple obtenu avec un mur de 3m, une imprécision angulaire maximale de 0,5° et une imprécision latérale en tête maximale de 0,02m – jusqu'à 18 blocs par étage, le critère est respecté

### Détermination du $h_{min}$

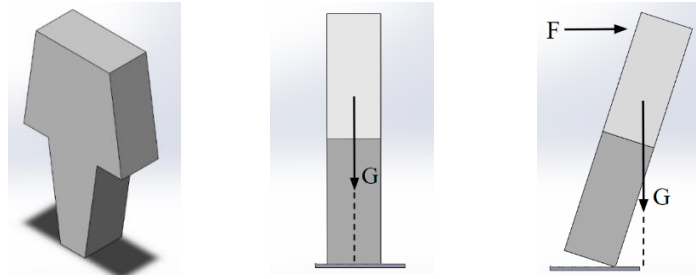
$h_{min}$  est donc la plus grande valeur des 3 obtenues ci-dessus:

$$h_{min} = \max[h_{min,frot}; h_{min,imp\_lat}; h_{min,imp\_ang}]$$

#### 2.2.2.4.2. Calcul de $h_{max}$

Il est important d'éviter d'obtenir des DEPT dont les proportions lui donnent une forme trop élancée; pour conserver une stabilité minimale et pour éviter des guides latéraux équipant le GGS trop longs et trop lourds. Raison pour laquelle il est important de limiter la valeur de  $h$ . On nommera  $h_{max}$  la valeur maximale de  $h$ . Elle pourra être définie par l'étude de l'influence de  $h$  sur la stabilité d'un DEPT au repos et en transport et également l'étude de son influence sur le poids du guide (qui dépend du type de GGS utilisé et de ses matériaux composants). Ici intervient l'épaisseur choisie: si l'épaisseur choisie est faible, il faudra limiter  $h$  pour conserver une stabilité latérale du DEPT lors de son stockage et de son transport ainsi que lors de la préhension par le drone (Figures 81). Une analyse de la stabilité a été effectuée et est disponible en Annexe A.3.1.

$$h(e, GGS) < h_{max}$$



Figures 81 - Instabilité du DEPT à épaisseur faible et hauteur élevée

#### 2.2.2.4.3. Choix du $h_{optimal}$

Après avoir déterminé précédemment les valeurs minimale et maximale de  $h$ , il faut procéder à un choix. Pour ce faire, l'idée est de faire varier la valeur de  $h$  entre  $h_{min}$  et  $h_{max}$ , tout en conservant la valeur de l'aire  $A = h(l + a)$  constante (voir section 2.2.2.5). En observant les élancements obtenus, l'utilisateur peut faire son choix de  $h$  (Figures 82).

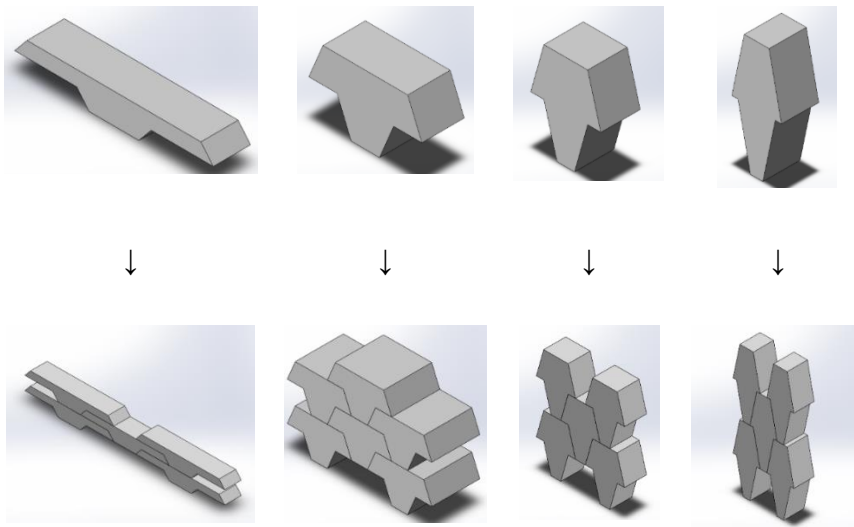
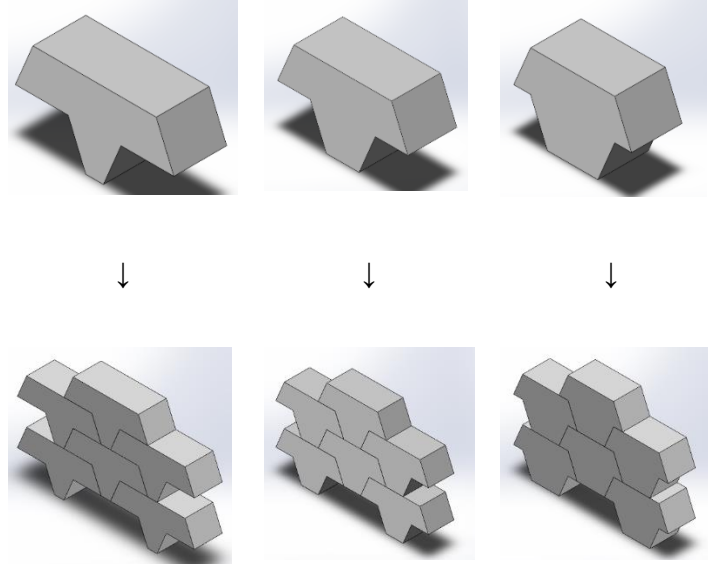


Figure 82 - Exemples de DEPT à  $h$  variable et  $A=h(l+a)$  constante

#### 2.2.2.5. La longueur de la base a

##### Détermination de $a_{min}$

La longueur de la base  $a$  est la dimension longitudinale de la face sur laquelle repose le DEPT en stockage. Le choix de sa valeur a donc une influence sur la stabilité du DEPT, puisqu'il définit aussi directement la valeur de la dimension des ailes  $b$  (figure X). Plus  $a$  est faible, plus  $b$  est grand et moins le DEPT est stable longitudinalement. Une étude de cette stabilité, qui dépend aussi de la hauteur  $h$ , la longueur totale  $l$  et de la tolérance  $t$ , doit alors être effectuée (Annexes 3.2 et 3.3).

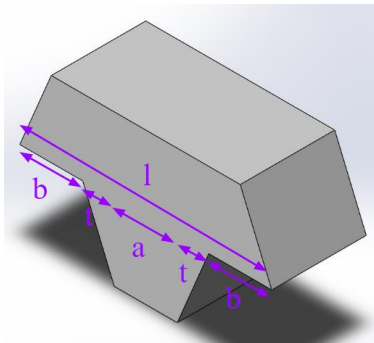


Figures 83 - Exemples de DEPT à  $a$  variable et  $l$  constant

On obtiendra alors une valeur minimale à affecter à  $a$ :  $a_{min}(h, l, t)$ .

##### Calcul de $a_{max}$

Pour que l'élément reste fonctionnel et drone-compatible, il est nécessaire que le DEPT conserve sa forme en T. Or, si la valeur de  $a$  choisie est trop grande, la valeur de  $b$  sera nulle voire négative. On obtiendra des DEPT à profil hexagonal (Figure 84) ou inversé (Figure 85).



$$l = 2 + 2b + 2t \Leftrightarrow b = \frac{l - a - 2t}{2}$$

Le critère à respecter est donc simple puisqu'on doit avoir une valeur de  $b$  strictement supérieure à 0:

$$b = \frac{l - a - 2t}{2} > 0 \Leftrightarrow a < l - 2t$$

$$a = l - 2t$$

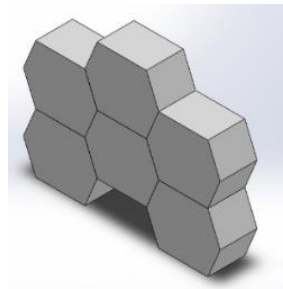
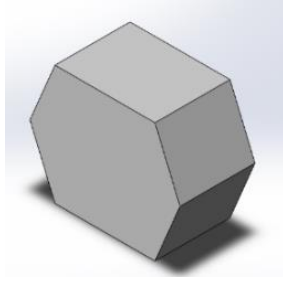


Figure 84 - DEPT à longueur de base égale à sa longueur maximale ( $l+2t$ )

$$a > l - 2t$$

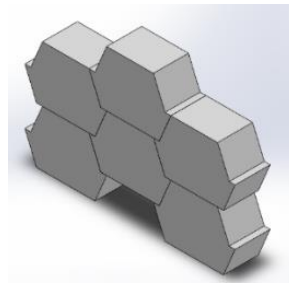
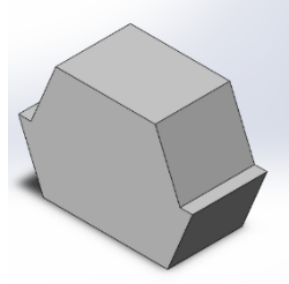


Figure 85 - DEPT à longueur de base supérieure à sa longueur maximale ( $l+2t$ )

On obtient donc  $a_{max} = l - 2t$  qui en plus d'être maximum, ne peut pas être atteint.

### Choix de a

Le choix de a est maintenant encadré par les deux valeurs obtenues ci-dessus:

$$a_{min} < a < a_{max}$$

Dans la plupart des cas, ces bornes laissent encore un vaste choix dans la valeur de a. Pour optimiser le système constructif par DEPT, un a optimal peut être déterminé ( $a_{opt}$ ). C'est en fait en étudiant la forme des DEPT dérivés utiles à la réalisation de coins et de jonctions entre plusieurs murs qu'une valeur optimale est trouvée (section 2.5).

#### 2.2.2.6. La longueur totale l

l représente la longueur d'un bout à l'autre du DEPT. Sa valeur optimale dépend des autres paramètres déjà établis: la charge utile du drone  $P_{max}$ , le poids volumique du béton  $\gamma_b$ , ainsi que les dimensions e, h et a choisies. En effet, il est déjà possible de déterminer l'aire de la face latérale du DEPT  $A_{DEPT}$  sur base des 3 premiers paramètres cités:

$$P_{max} = \gamma_b * A_{DEPT} * e \Leftrightarrow A_{DEPT} = \frac{P_{max}}{\gamma_b * e} \quad (1)$$

Or, l'expression de cette aire est simple à obtenir et dépend uniquement de  $a$ ,  $l$  et  $h$  (Figure 86).

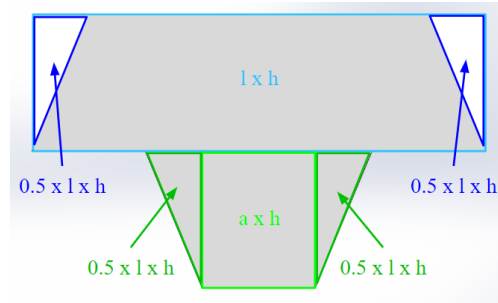


Figure 86 - Calcul de l'aire latérale du DEPT

$$A_{DEPT} = l * h - 2 \left( \frac{h * t}{2} \right) + h * a + 2 * \left( \frac{h * t}{2} \right) = (a + l) * h \quad (2)$$

$$(1) \text{ et } (2) \Rightarrow (a + l) = \frac{P_{max}}{\gamma_b * e * h} \quad (3)$$

Et on obtient alors l'expression de  $l$ :

$$l = \frac{P_{max}}{\gamma_b * e * h} - a$$

On remarque que, lors du choix de la valeur de  $a$ , celle-ci est bornée par  $a_{max}$  qui dépend de  $l$ . On ne sait donc pas déterminer une valeur de  $a$  puis une valeur de  $l$  l'une après l'autre. En fait, l'expression (3) donne la valeur de la somme  $(l+a)$  avec les autres paramètres déjà déterminés (charge utile, poids volumique, épaisseur et hauteur), et c'est sur base de la valeur de cette somme que s'effectuera le choix d'une valeur  $a$ . Tout cela sera expliqué en section 2.2.3.

#### 2.2.2.7. La longueur des ailes $b$

$b$  correspond à la longueur longitudinale des faces de pose du DEPT (ou ailes). Cette dimension est directement obtenue à partir des valeurs de la longueur totale  $l$ , la longueur de la base  $a$  et la tolérance  $t$ .

$$b = l - a - 2t$$

### 2.2.3. Calcul des dimensions optimales

Le rôle de chaque dimension et leurs contraintes existantes ont été décrites en profondeur dans la section 2.2.2. Il est maintenant possible, sur base de certains choix, d'obtenir les dimensions optimales d'un DEPT. Une feuille Excel, englobant tout ce qui permet cette optimisation, est disponible en Annexe A.2. Cette section décrira les étapes et les choix à effectuer pour en arriver au DEPT le plus efficace et ergonomique possible.

#### Données

Dans un premier temps, les données sont ajoutées. Elles dépendent du drone et du GGS utilisés, des exigences de l'utilisateur ou encore du matériau utilisé pour la fabrication du DEPT.

Notons que l'angle de glissement à ajouter ne doit pas précisément correspondre à l'angle de frottement du matériau. Comme mentionné en section 2.2.2.3, il faut prévoir un angle de glissement supérieur à l'angle de frottement pour s'assurer du bon glissement des DEPT entre eux lors de la pose.

Le coefficient de réduction du poids  $\beta_{matière}$  correspond au pourcentage de volume rempli de matière dans le DEPT. Si le DEPT est plein, il vaut 100%; s'il est composé de vide, il est inférieur à 100%.

## Calcul de l'aire

Une fois les données entrées, le calcul de l'aire latérale du DEPT se fait aisément en donnant au DEPT à dimensionner une masse dépendant de la charge utile du drone. L'épaisseur et le poids volumique étant défini également, on obtient l'aire optimale latérale:

$$A_{DEPT} = \frac{P_{max}}{\gamma_b * e * \beta_{matière}}$$

## Choix de h

L'étape suivante consiste à calculer les  $h_{min}$  et  $h_{max}$ , permettant par la suite de choisir une valeur de la hauteur h (voir section 2.2.2.4).  $h_{min}$  est la plus grande valeur des trois calculées précédemment ( $h_{min,frot}$ ;  $h_{min,imp,lat}$ ;  $h_{min,imp,ang}$ ). La feuille 2 du fichier Excel permet de trouver  $h_{min,imp,ang}$  cherchant le décalage latéral total obtenu pour chaque quantité de DEPT placés par étage. Tant que ce décalage est inférieur à la limite exigée notée dans les données, la hauteur correspondante peut être choisie.  $h_{min,imp,ang}$  étant la plus petite hauteur qui valide cette condition.

Puis,  $h_{max}$  est déterminé par l'analyse de stabilité latérale du DEPT et par l'influence de h sur la masse du GGS dont les dimensions de certains éléments dépendent directement.

Une valeur de h est choisie entre  $h_{min}$  et  $h_{max}$ , selon le choix de l'utilisateur.

La somme ( $a + l$ ) en est déduite:

$$(a + l) = \frac{A}{h}$$

## Choix de a

On calcule ensuite  $a_{min}$ , nécessitant également une analyse de stabilité, cette fois dans la direction longitudinale du DEPT (Annexes 3.2 et 3.3).  $a_{max}$  est calculée grâce à la somme ( $a + l$ ) et l'inéquation exigeant une longueur d'aile b positive.

$$(a + l) = k \quad (\text{calculé précédemment}) \quad (1)$$

$$a < l - 2t \quad (2)$$

$a_{max}$  est obtenu lorsqu'il vaut  $l - 2t$ ; b sera alors nul.

$$a_{max} = l - 2t \quad (3)$$

$$a_{max} = k - l \quad (4)$$

$$(3) \text{ et } (4) \Rightarrow l - 2t = k - l$$

$$\Leftrightarrow l = (k + 2t)/2$$

Et donc,

$$a_{max} = k - (k + 2t)/2$$

Où k vaut la somme ( $a + l$ ).

Finalement, il est intéressant de calculer la valeur du  $a_{optimal}$ . Il correspond à la valeur de la longueur de la base qui donne une longueur d'aile  $b$  égale à l'épaisseur  $e$ , permettant de simplifier et équilibrer les DEPT utilisés pour la construction de coin de mur (section 2.5.3). Donc:

$$l = a + 2t + 2b \Leftrightarrow l = a_{optimal} + 2t + 2e$$

$$\Leftrightarrow a_{optimal} = l - 2t - 2e$$

Il vient alors le choix de  $a$ . Si  $a_{optimal}$  est supérieure à  $a_{min}$  et inférieure à  $a_{max}$ , il sera judicieux de le choisir comme valeur de  $a$ . Sinon, il faut choisir un  $a$  respectant ces deux bornes.

### Calcul de $l$ et $b$

Les valeurs de  $l$  et  $b$  découlent des autres dimensions déterminées précédemment (voir section 2.2.2.6 et 2.2.2.7):

$$(l + a) = k \Leftrightarrow l = k - a$$

$$l = a + 2t + 2b \Leftrightarrow b = (l - 2t - a)/2$$

## 2.3. Réduction du poids

Comme il a été spécifié en section précédente, la charge utile du drone et donc le poids de l'élément est un paramètre important dans la détermination des dimensions du DEPT. Augmenter ses dimensions va induire une augmentation du poids du bloc, mais diminuera le nombre de blocs à placer et donc le coût et la durée de construction. Il est donc question ici de trouver des pistes pour diminuer le poids des DEPT tout en conservant ses dimensions. Deux solutions existent: diminuer le poids volumique du matériau et supprimer le poids superflu. La première solution sera décrite en section 2.4.2, et consistera en fait à remplacer les graviers et le sable par de l'Argex et de l'Argex concassé.

La seconde solution vise à déterminer les zones où la présence de matière s'avère inutile. Ces zones seront alors vidées pour obtenir des blocs creux, technique déjà utilisée pour les éléments de maçonnerie traditionnelle. Des économies de matière et de poids seront alors réalisées pour arriver à un élément moins cher à la production, plus léger et permettant de construire des murs de mêmes dimensions mais avec moins d'éléments au mètre carré.

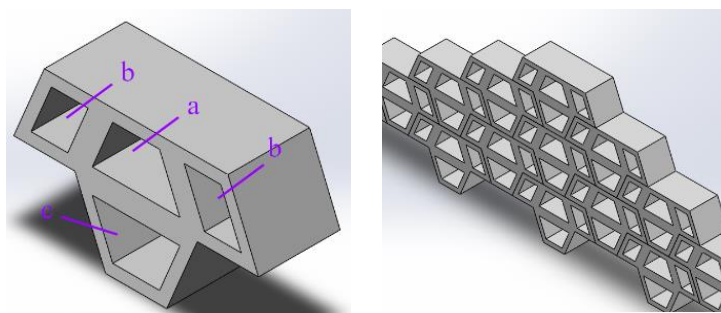
Dans un premier temps, plusieurs possibilités de blocs creux seront présentées, sans étudier en amont les contraintes s'exerçant dans le bloc en chargement. La matière est ici enlevée par simple choix et par bon sens, afin d'arriver à un bloc creux gardant ses propriétés originelles.

Ces blocs creux sont ici présentés à titre illustratif, pour proposer les possibilités existantes sans toutefois en étudier en profondeur les détails dimensionnels.

### 2.3.1. DEPT à creux transversaux

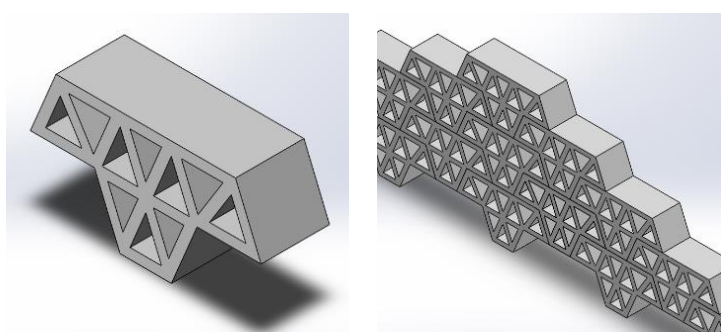
Dans cette section, des solutions de DEPT creux mais toujours extrudables sont proposées.

Tout d'abord, le DEPT creux composé d'un creux au centre (a), de deux creux dans les ailes (b) et d'un creux dans la base (c) (Figures 87). On peut ainsi réduire le poids du bloc de 20 à 55% selon l'épaisseur de matière conservée.



Figures 87 - DEPT à creux transversaux trapézoïdaux

Autre exemple, où le DEPT est creusé uniquement par des volumes de section triangulaire (Figures 88). La largeur des parois conservée au sein de l'élément peuvent être définis selon la résistance du matériau utilisé. Il est possible de réduire le poids de l'élément jusqu'à 65%.



Figures 88 - DEPT à creux transversaux triangulaires

Dans les deux cas, le DEPT conserve donc son caractère extrudable, mais forme des murs forcément à trous. Raison pour laquelle une seconde possibilité est proposée dans la section 2.3.2.

### 2.3.2. DEPT à creux verticaux

Un second type d'éléments vidés est donné en Figures 90. On s'inspire ici des creux placés dans les blocs béton classiques, qui sont eux aussi vidés de la base à la face supérieure (Figure 89). Les murs obtenus sont donc fermés latéralement.



Figure 89 - Bloc béton creux de maçonnerie traditionnelle

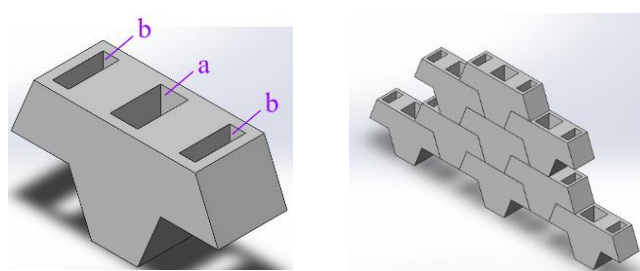


Figure 90 - DEPT creusé verticalement

Les volumes de vides sont des parallélépipèdes rectangles, un placé au centre du bloc (a), et deux autres dans les ailes (b). Leurs dimensions sont définies comme suit (Figure 91) :

- le vide (a) possède une base de longueur  $a_{DEPT} - 2e_{matière}$  et de largeur  $e_{DEPT} - 2e_{vide}$
- les vides (b) sont de longueur  $(b_{DEPT} - t_{DEPT}) - 2e_{matière}$  et de largeur  $e_{DEPT} - 2e_{vide}$

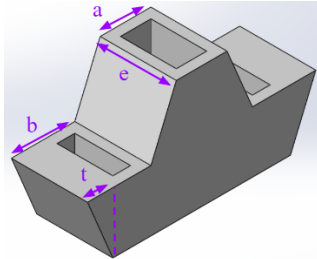


Figure 91 - Dimensions des vides

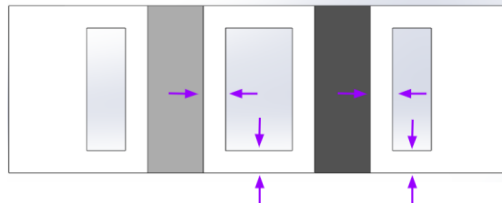
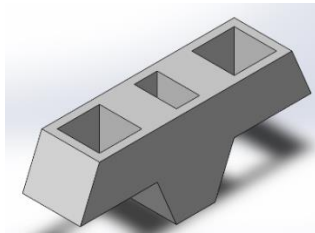


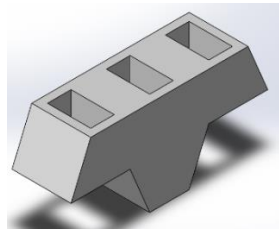
Figure 92 - Définition de l'épaisseur de matière

L'épaisseur de matière conservée  $e_{matière}$  (Figure 92) peut être définie sur base de l'étude de résistance du matériau considéré. Le but étant de maximiser le volume de vide tout en conservant une résistance suffisante du DEPT.

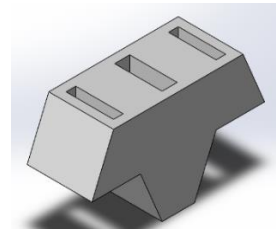
La diminution de poids résultante dépend des dimensions des volumes de vide, donc de  $e_{matière}$ ,  $a_{DEPT}$ ,  $b_{DEPT}$  et  $t_{DEPT}$ . Plus les dimensions de la longueur de la base  $a$  et la longueur d'ailes  $b$  sont grandes par rapport à la hauteur  $h$ , plus la réduction de poids sera importante (Figures 93).



32,23% de perte



25,53% de perte

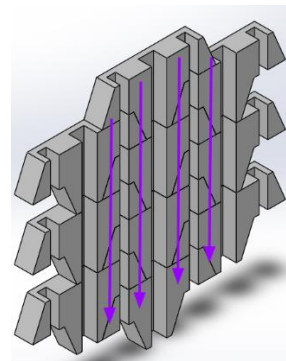
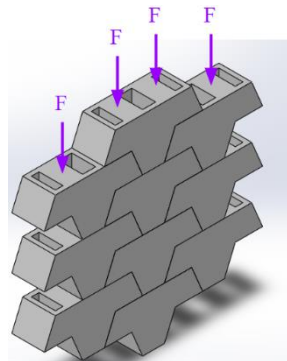


17,75% de perte

Figures 93 - Perte de matière pour différent rapport  $l/h$

La diminution du poids du bloc peut ainsi varier entre 15 et 40% selon les proportions du DEPT et la valeur de  $e_{matière}$ .

Avec cette forme de retrait de matière, les charges sont directement transmises verticalement aux éléments inférieurs (Figures 94).



Figures 94 - Transfert vertical des charges

Mais il est important de constater que l'élément perd ici son caractère extrudable et donc l'avantage économique qui en découle. Cependant, d'autres procédés de fabrication rendent possibles la production de tels éléments, comme la fabrication par moulage (section 1.3.2) ou par presse et vibrage (section 1.3.3). L'avantage économique tiré d'une diminution du poids des éléments peut ainsi compenser les surcoûts liés à une fabrication autre que par extrusion.

Ce dérivé creusé du DEPT est appelé DEPT à creux verticaux ou « vertical voids » en anglais, d'où son abréviation « DEPT-VV » dans la suite de ce travail.

## 2.4. Modèle d'essai

Afin d'effectuer des tests grandeur nature en laboratoire, avec et sans drone, les dimensions et le matériau constitutif du modèle d'essai ont été définis en fonction des paramètres extérieurs imposés et de certains choix qui seront défendus ci-après.

### 2.4.1. Paramètres extérieurs

D'abord, le drone d'essai dispose d'une charge utile de 30kg. Afin d'assurer une bonne maniabilité du drone lors des tests et de tenir compte de la masse du GGS qui s'ajoutera, on visera une masse maximale du DEPT d'essai de 15kg.

Autre paramètre imposé, la valeur de la tolérance, c'est-à-dire l'imprécision de pose du drone, établie à 5 cm. Cette valeur a été établie suite aux premiers essais avec drone piloté par un pilote entraîné.

Enfin, l'angle de frottement minimal a été déterminé lors d'un essai de mesure du coefficient de frottement (Annexe A.1) et vaut environ 30°. Il semble alors prudent d'inclure au modèle d'essai un angle de frottement plus élevé pour garantir le glissement entre les DEPT lors de la pose.

### 2.4.2. Matériau constitutif

Les DEPT d'essais seront fabriqués en béton, composé d'Argex et Argex concassé remplaçant des graviers et du sable. Le poids volumique d'un tel matériau a été repris des travaux de J.-F. Leboutte et V. Parisel (3) et vaut environ 1500 kg/m<sup>3</sup> (pour une composition proposée Tableau 1). Le modèle d'essai sera défini sur base de cette valeur, tout en veillant à conserver une marge en cas de béton coulé au poids volumique légèrement supérieur.

### 2.4.3. Choix de dimensions

La détermination des dimensions h, e, l et a (et donc b) pour le modèle de test n'est pas fortement contrainte, mais l'objectif est d'obtenir un DEPT d'essais:

- fonctionnel et ergonomique;
- facile à fabriquer;
- résistant aux chocs lors de sa manipulation;
- pouvant servir de base à toute sorte de tests de pose, préhension, stabilité et résistance;
- adapté aux conditions de tests en laboratoire, au matériau et au drone d'essai utilisé;
- possédant des dimensions et proportions proches des éléments de maçonnerie traditionnelle.

Des choix ont alors été fait pour satisfaire au mieux à chacun de ces critères. Premièrement, les valeurs de  $a$  et  $b$  doivent être assez élevées pour permettre une facilité de production. Deuxièmement, la valeur de l'angle de glissement doit rester dans des grandeurs suffisamment élevées pour garantir la pose sans accro et éviter l'obtention d'arêtes minces et donc fragiles lors de la manipulation. Troisièmement, les dimensions de la base  $a$  et de l'épaisseur  $e$  doivent être suffisantes par rapport à la hauteur  $h$  pour garantir la stabilité du bloc lors de son stockage et lors du premier contact avec le drone qui vient saisir l'élément.

Le dernier choix est de donner au DEPT d'essai des proportions proches de celle des éléments de maçonnerie traditionnelle. Les essais donneront alors lieu à la réalisation de murs plus proches dimensionnellement parlant aux murs classiques. L'épaisseur  $e$ , la hauteur  $h$  et la longueur totale  $l$  ont été choisies sur cette base de cette idée.

#### 2.4.4. Élément de test

Les dimensions de l'élément de test ont été choisies à partir de ce qui a été énoncé ci-dessus et sont reprises dans le schéma ci-dessous (Figure 95). Le plan détaillé du DEPT d'essais est disponible en Annexe A.4.

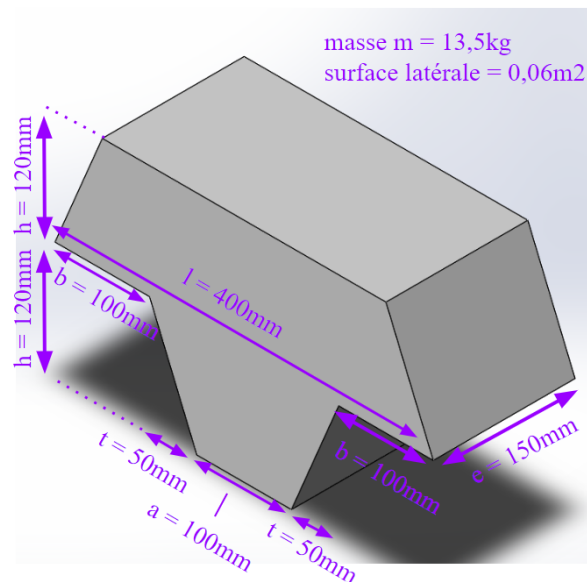


Figure 95 - Dimensions du DEPT d'essais

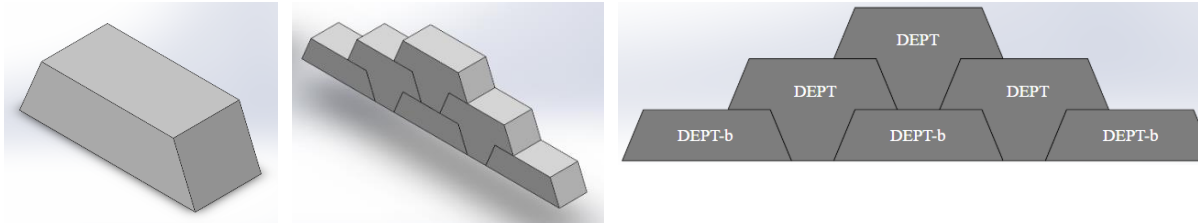
### 2.5. Intégration aux éléments de maçonnerie traditionnelle

Le rôle premier du DEPT est de permettre la construction de structures et bâtiments tels qu'ils existent à l'heure actuelle. Les structures qu'il sera possible de construire via ce nouveau type d'éléments de maçonnerie sont des structures de type maisons unifamiliales, c'est à dire composées de murs droits, de coins, de jonctions, etc. Il n'est pas imaginable d'obtenir de telles constructions avec l'unique utilisation du DEPT de base. Il est donc nécessaire de développer des DEPT dérivés afin de pouvoir, à l'avenir, bâtir des édifices tels qu'on les connaît aujourd'hui.

L'objectif de cette section est de présenter l'ensemble de ces DEPT dérivés imaginés et assemblés pour former une structure de type maison unifamiliale. Le développement de ses dérivés a été effectué sur le logiciel SolidWorks. Les dimensions du DEPT et de ses dérivés qui y sont modélisés sont celles du DEPT d'essais (section 2.4.4).

### 2.5.1. Le DEPT-b

Le premier DEPT dérivé sert de base à la construction d'un mur. Le caractère progressif de la construction par DEPT (voir section 1.4.2.4) impose ainsi la création du DEPT-b ("b" pour base). Il consiste simplement en un élément dont la partie inférieure a été enlevée (Figures 96). Notons que plusieurs DEPT-b sont nécessaires à la réalisation d'essais, pour servir de base au mur à construire. Leur fabrication est illustrée en section 4.1.1.3.



Figures 96 - DEPT-b et composition d'un mur simple

### 2.5.2. Le DEPT-c et DEPT-cb

La réalisation de coins nécessite également d'imaginer un nouveau dérivé: le DEPT-c ("c" pour corner, coin en anglais). Dans la volonté d'obtenir un élément qui conserve un caractère extrudable et en évitant de devoir créer 2 nouveaux dérivés pour composer un coin de murs, le DEPT-c possède une face longitudinale dépourvue de surface de glissement. Les faces sont verticales et les angles droits, pour permettre un emboîtement tel qu'imposé par une jonction en coin de deux murs (Figures 97).

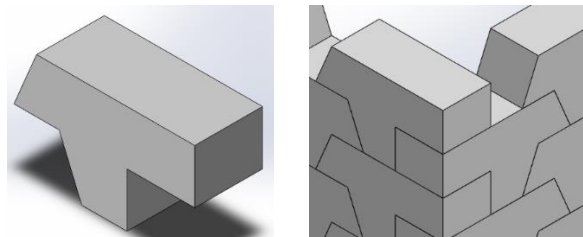
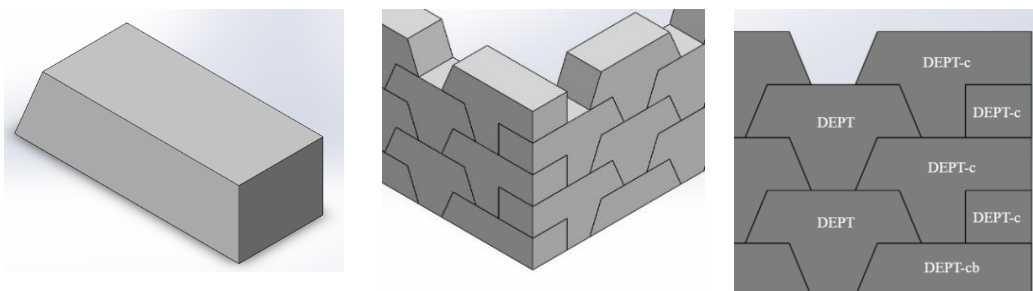


Figure 97 - DEPT-c

L'imprécision de pose de 5 cm de chaque côté du bloc n'est donc corrigée que d'un seul côté. L'utilisation du DEPT-c impose alors de doubler la reprise de l'imprécision de pose de l'autre côté pour conserver la capacité du bloc à corriger les imprécisions. Les DEPT utilisés doivent donc aussi être adaptés. Les DEPT posséderont alors de chaque côté des faces de glissement de longueur deux fois supérieures que précédemment.

Notons que le DEPT-cb est l'équivalent du DEPT-b pour le DEPT-c (Figures 98).

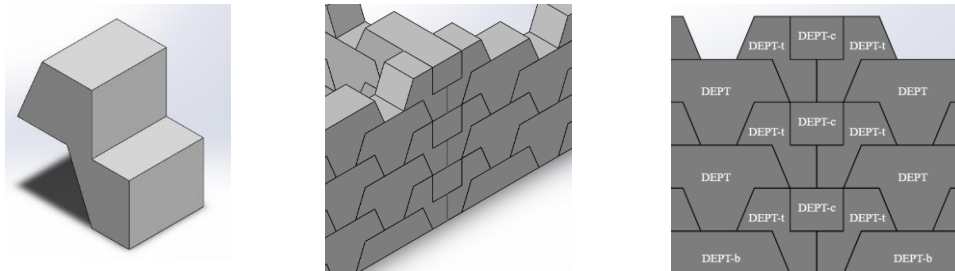


Figures 98 - DEPT-cb et composition d'un coin de mur

### 2.5.3. Le DEPT-t

L'étape suivante est le DEPT-t, menant à la réalisation de la jonction d'un mur perpendiculaire à un mur continu. Le DEPT-t ("t" pour la forme géométrique T d'une jonction) est extrudable lui aussi. La jonction est alors composée à la fois de DEPT-t et des DEPT-c précédemment illustrés (Figures 99). Ici aussi, la reprise de l'imprécision n'est faite que d'un seul côté du bloc, il faut donc doubler la tolérance de pose.

Il est intéressant de voir que si on donne au DEPT de base des valeurs de la longueur de sa base  $a$  et de son épaisseur  $e$  égale, on obtient des jonctions dont la longueur est la même qu'un mur sans jonction.



Figures 99 - DEPT-t et composition d'une jonction de murs

### 2.5.4. Le DEPT-e et le DEPT-eb

Le but du DEPT-e ("e" pour end, extrémité en anglais) est simple: ils sont utilisés pour composer l'interruption d'un mur: l'extrémité d'un mur non-fermé ou une ouverture (fenêtre, porte). Il serait facile d'imaginer un élément à la forme simple donnée en Figure 100. Mais la forme de l'élément ne corrigera pas l'imprécision de pose dans la direction du mur à son extrémité (Figure 101).

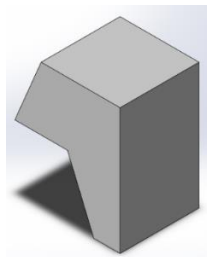


Figure 100 - Possibilité de DEPT-e

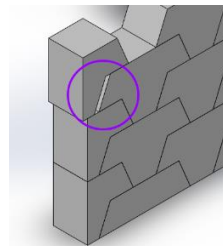
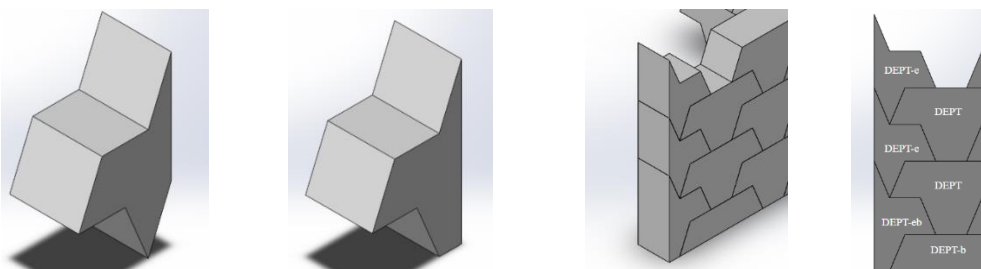
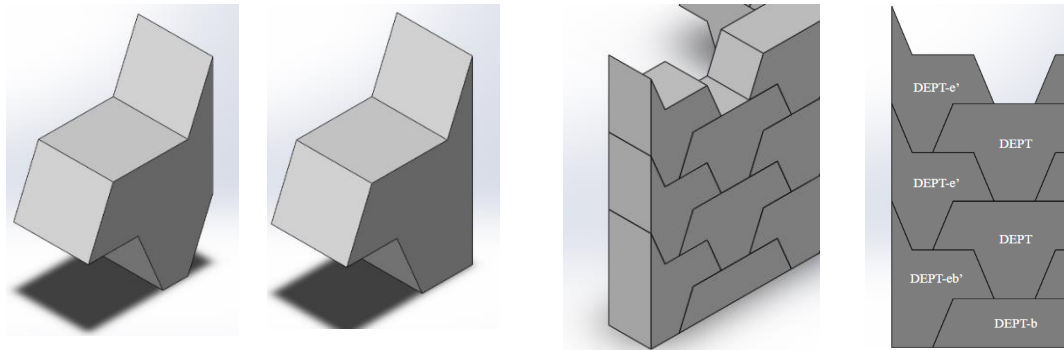


Figure 101 - Imprécision longitudinale de pose à l'extrémité non-corrigée

La solution proposée pour résoudre ce problème est alors le DEPT-e et son DEPT-eb associé. La forme de ces éléments est plus complexe mais est extrudable (Figures 102). Notons que le DEPT-e n'est pas stable en stockage vu sa base de longueur nulle. Mais il est possible d'imaginer le même élément avec une longueur de base positive, permettant à la fois de rendre le bloc plus stable en stockage, mais aussi modifier la longueur de l'extension du mur pour lui donner la longueur voulue (Figures 103).



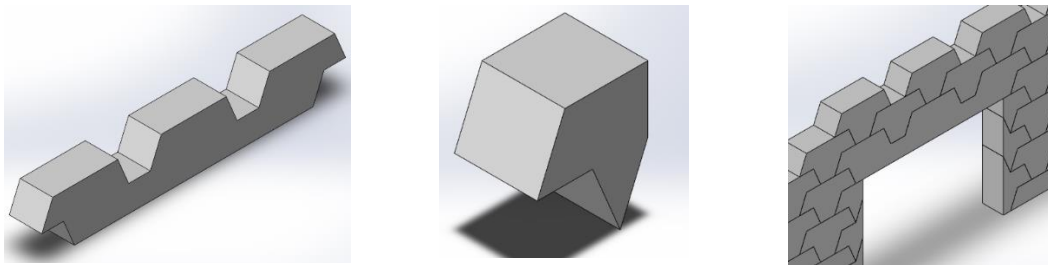
Figures 102 - DEPT-e, DEPT-eb et composition d'une extrémité de mur



Figures 103 - DEPT-e', DEPT-eb' et composition d'une extrémité de mur

### 2.5.5. Le DEPT-lx et le DEPT-lb

Il faut imaginer maintenant le dérivé du DEPT qui remplacera le linteau de la maçonnerie traditionnelle. C'est pour cela que le DEPT-lx ("l" pour linteau, linteau en anglais) a été développé (Figures 104). La lettre "x" donne la longueur en terme de DEPT de base du linteau: par exemple, un DEPT-l3 possède une portée de 3 DEPT (Figure 106). Le DEPT-lb sert lui de base à la pose de ces DEPT-lx.



Figures 104 - DEPT-21 et DEPT-lb

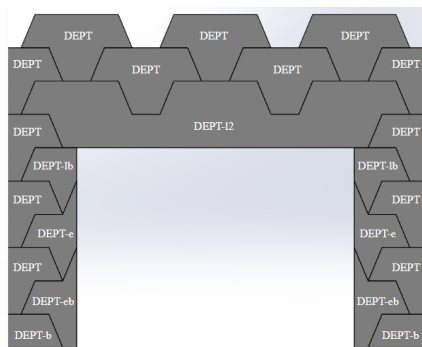


Figure 105 - Composition d'une portée de 2 DEPT

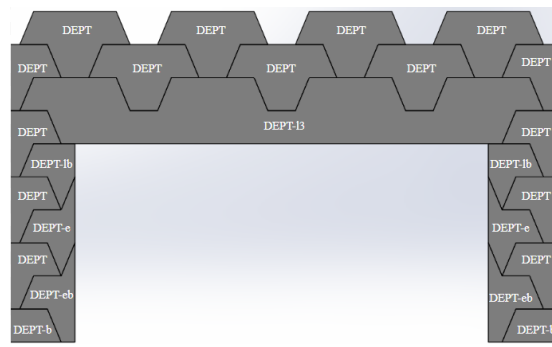


Figure 106 - Composition d'une portée de 3 DEPT

Pour mettre en place de tels éléments (masse de 82,350kg pour le DEPT-l3 si on considère un béton=1500kg/m<sup>3</sup> et les dimensions de base du DEPT d'essai), on peut imaginer deux drones travaillant ensemble et utilisant les deux DEPT-lb comme appuis pour la correction de l'imprécision de pose latérale (Figure 107).

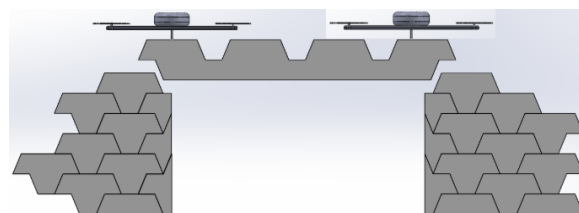


Figure 107 - Mise en place d'un DEPT-l3 par 2 drones

## 2.5.6. Autres DEPT dérivés

Beaucoup d'autres dérivés du DEPT peuvent être imaginés pour remplacer certains éléments de la maçonnerie traditionnelle, ou permettre la construction de structure plus complexe. Certains exemples sont illustrés ci-dessous (Tableau 2). Ces éléments ne sont pas extrudables et devront être fabriqués par presse (section 1.3.3).

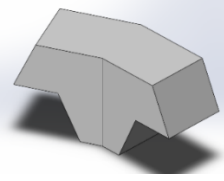
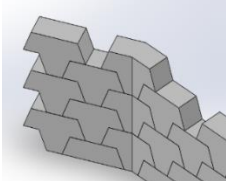
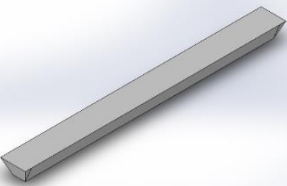
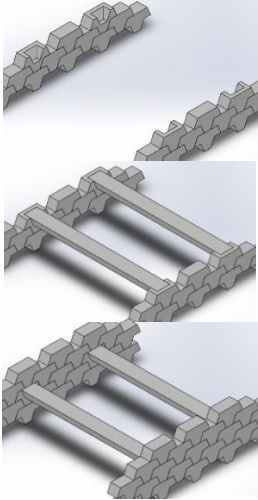
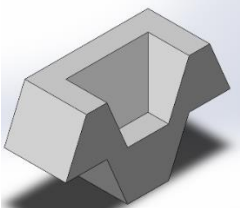
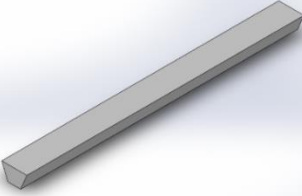
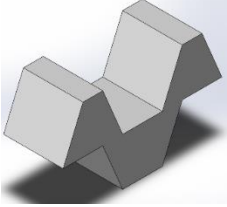
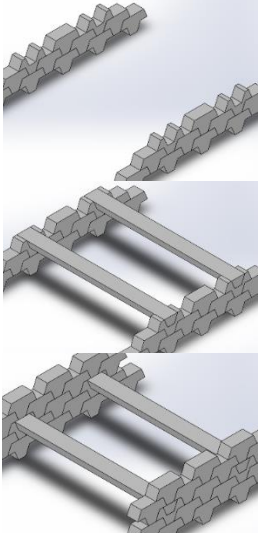
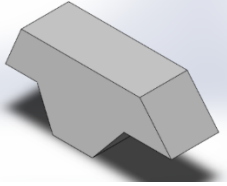
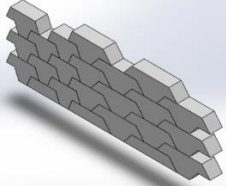
|                                     |                                                                                                               |                                                                                      |                                                                                       |
|-------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| DEPT- $\alpha$<br>(angulaire)       | Construction de murs avec angle $\alpha$                                                                      |     |    |
| DEPT-bm<br>(beam)                   | Poutre adaptée au système DEPT<br>-<br>non-extrudable                                                         |     |   |
| DEPT-bmb<br>(beam base)             | Elément permettant la pose de poutre<br>-<br>non-extrudable                                                   |    |                                                                                       |
| DEPT-bm'<br>(extrudable beam)       | Poutre adaptée au système DEPT<br>-<br>extrudable mais utilisation guide des drone de pose en extrémité       |  |                                                                                       |
| DEPT-bm'b<br>(extrudable beam base) | Elément permettant la pose de poutre<br>-<br>extrudable mais utilisation guide des drone de pose en extrémité |   |  |
| DEPT-j<br>(junction)                | Elément permettant de joindre deux murs de DEPT à dimensions différents (h et e constants)                    |   |  |

Tableau 2 - Autres dérivés du DEPT imaginés

### 2.5.7. Conclusion

A travers le développement de toutes ces formes dérivées du DEPT, on a pu montrer toute la polyvalence de cette typologie d'élément. Pour fabriquer des maisons unifamiliales composées uniquement de murs droits, coins, jonctions et ouvertures rectangulaires, tous les éléments nécessaires sont extrudables en plus d'être drone-compatibles.

Même lorsque l'architecture du bâtiment nécessite des murs à angles, le DEPT peut être dérivé en perdant toutefois son caractère extrudable (DEPT- $\alpha$ ). Cela dit, c'est également ce que l'on constate dans la construction par briques (Figure 108).

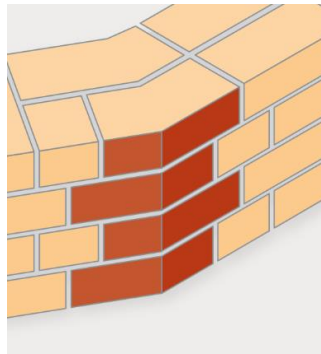


Figure 108 - Murs à angle en briques

La dérivé DEPT-j permet de passer d'un mur composé de DEPT possédant certaines dimensions à un mur composé d'autres DEPT avec d'autres dimensions  $a$ ,  $b$ ,  $l$  et  $t$ . Il est donc aisément possible de concevoir une maison constituée d'éléments DEPT de plusieurs dimensions de base.

Des solutions sont proposés pour la pose de poutres dans des murs de DEPT, une solution à éléments non-extrudables ainsi qu'une solution à éléments extrudables mais qui nécessite le guidage de la poutre dans la direction perpendiculaire au mur: il suffit pour cela d'ajouter au GGS des guides longitudinaux. Le placement d'un plancher sur ces poutres est également possible avec des drones, en se basant sur le procédé déjà existant des « poutres-claveaux (Figures 109, (5)). Il suffirait alors de l'adapter au système drone-compatible.

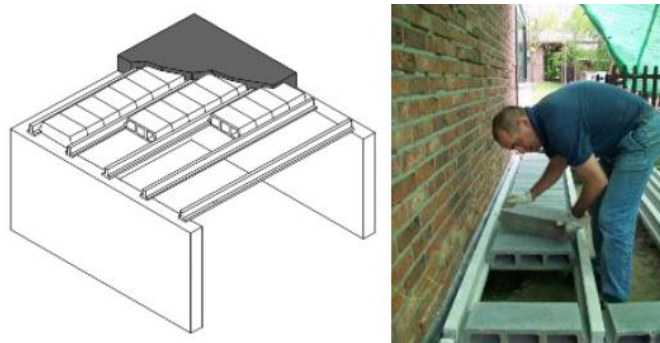


Figure 109 - Système "poutre-claveaux"

Les systèmes de préhension et de pose de tous les DEPT dérivés présentés ici diffèrent alors de celui qui sera développé dans la suite de ce travail. Cela dit, le principe d'utilisation d'un système remplissant le rôle de préhension et de guidage latéral de pose est le même.

Les plans détaillés des DEPT dérivés sont disponibles en Annexe A.4.

## 2.6. Fabrication du DEPT et de ses dérivés

### 2.6.1. Introduction

Dans ce travail, une importance toute particulière a été donnée à développer une forme d'éléments simples afin d'en faciliter la production de masse et ainsi en réduire le coût. Suite à l'étude des principaux procédés de fabrication en section 1.3 et au choix de la typologie du DEPT, cette section vise à déterminer le ou les procédés de fabrication et notamment en ce qui concerne le DEPT à creux verticaux (DEPT-VV) (section 2.3.2). Les gains en terme de poids et de quantité de matériau nécessaire à sa fabrication sont élevés et permettraient de réduire les coûts liés à son utilisation. Il paraît donc indispensable d'établir le procédé le plus adapté à sa production.

### 2.6.2. Fabrication par extrusion

L'élément développé possède une forme dite extrudable, c'est à dire que son profil latéral est constant sur sa profondeur et donc permet sa fabrication par le procédé d'extrusion (section 1.3.4). Cependant, ce procédé est presque exclusivement utilisé pour fabriquer des éléments en terre cuite et il est difficile de l'adapter pour des éléments en béton. Il est cependant possible qu'à l'avenir, des techniques d'extrusion d'éléments en béton soient développés dans l'industrie et permettraient la fabrication abordable du DEPT plein et de la plupart de ses dérivés pleins (section 2.5).

De plus, fabriquer avec ce procédé des éléments creux garantissant l'imperméabilité des murs (DEPT-VV, section 2.3.2) est impossible.

Même si ce caractère extrudable du DEPT se présentait comme son énorme point fort pour sa production, les autres procédés sont plus adaptés à sa fabrication.

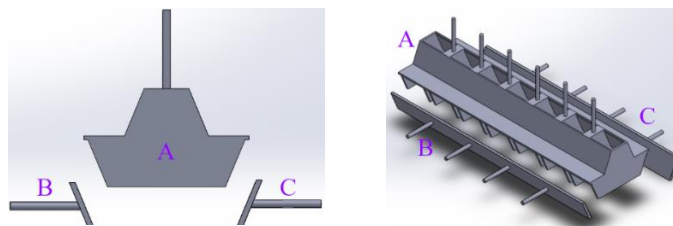
### 2.6.3. Fabrication par presse et vibration

Le DEPT classique peut être facilement fabriqué par le procédé décrit en section 1.3.3, en plaçant une face latérale de l'élément sur la table de presse. Par contre, ce n'est pas le cas du DEPT à creux verticaux.

Le DEPT-VV peut être fabriqué par presse et vibration en plaçant sa face supérieure sur la table de presse. Le moule utilisé comporterait alors des éléments additionnels à la forme des creux. Une difficulté apparaît puisque le DEPT possède des faces inclinées vers l'extérieur. La remontée d'un moule classique accrocherait les parties dites « ailes » de l'élément (voir section 1.3.3, Figures 38 à 41).

Il faut donc imaginer une autre forme de moule utilisable par ce procédé. La décomposition de celui-ci en 3 parties distinctes pourrait solutionner le problème et semble réalisable (Figures 109) :

- la partie supérieure A, composée du moule des faces inférieures, latérales et des creux du DEPT-VV, soulevée verticalement lors du démoulage ;
- les parties latérales B et C, moulant les faces de glissement supérieures du DEPT-VV, tirées latéralement lors du démoulage.



Figures 110 - Décomposition du moule

Une passe de fabrication de DEPT avec ce procédé et le moule décomposé se déroulerait alors comme suit (Figures 110 à 113).

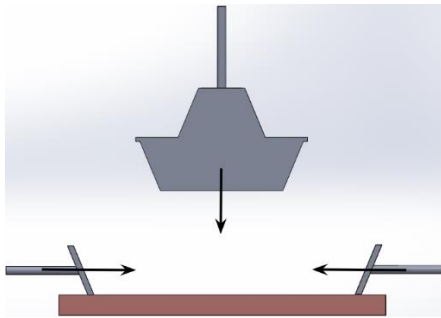


Figure 111 - Mise en place des moules

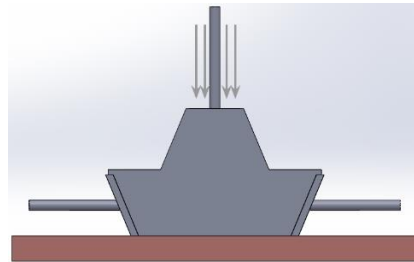


Figure 112 - Coulage du béton par le haut du moule

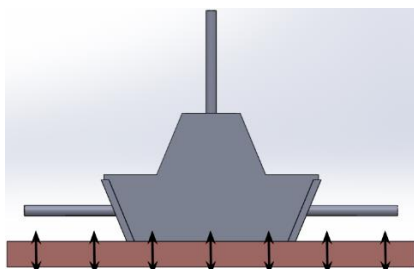


Figure 113 - Vibrage de la table de presse et presse par bac distributeur

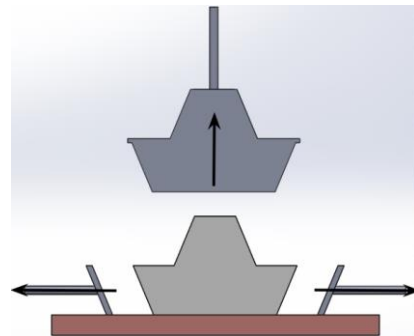


Figure 114 - Démoulage

Plusieurs éléments pourraient être fabriqués à la fois (Figures 114).

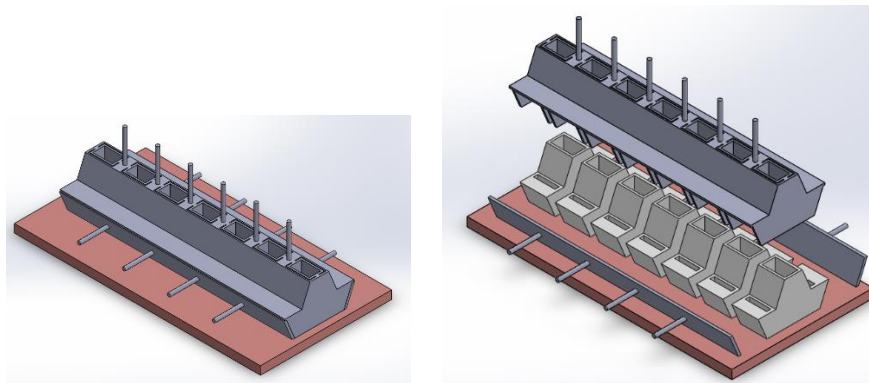


Figure 115 - Exemple d'un moule permettant de fabriquer 7 DEPT-VV à la fois

La plupart des éléments dérivés du DEPT peuvent être fabriqués via ce procédé. Ceux auxquels des creux verticaux seront ajoutés (DEPT-b, DEPT-c, DEPT-cb, etc) seront coulés et pressés avec leur face supérieure contre la table de presse. Les autres éléments (DEPT-t, DEPT-e, DEPT-eb, DEPT-lb, DEPT-bm, etc) le seront sur une de leur face latérale puisqu'il semble inutile d'y placer des volumes vides.

Deux constats pourraient mettre en doute la possibilité de produire les DEPT-VV avec ce procédé. Premièrement, rien ne prouve à l'heure actuelle qu'une telle décomposition du moule est possible et une étude sur le sujet doit avoir lieu pour confirmer l'hypothèse de sa faisabilité. Deuxièmement, les DEPT doivent avoir un rendu de surface suffisant pour assurer leur assemblage précis et le glissement entres les faces inclinées. Il faudra alors utiliser un béton relativement liquide empêchant l'utilisation du procédé décrit dans cette section. Des recherches et des essais en laboratoire doivent être effectués pour

déterminer la possibilité d'obtenir un béton donnant une qualité de surface suffisante des éléments tout en rendant possible leur fabrication par procédé de pressage et vibration. Notons également que ce béton devra contenir des billes d'Argex et de l'Argex concassé pour réduire la masse du DEPT.

#### 2.6.4. Fabrication par moulage

Si ce n'est pas possible, il faudra alors se tourner vers la fabrication par moulage, plus lente et bien plus coûteuse. N'importe quelle forme d'élément peut être réalisé par moulage.

Ce procédé est parfaitement adapté à la fabrication de certains dérivés du DEPT à produire en faible quantité, comme par exemple le DEPT- $\alpha$  et les DEPT-lx.

#### 2.6.5. Conclusion

Chaque cas de DEPT ou DEPT dérivés nécessitent des procédés différents de fabrication. Pour réduire les coûts de fabrication au maximum, les DEPT et la plupart de ses dérivés, pleins ou creux, sont à produire par le procédé de presse-vibration à condition que cela soit possible (décomposition du moule et existence d'un béton respectant les critères cités plus haut). Seuls les exceptions telles que le DEPT- $\alpha$  (petite quantité) et les DEPT-lx de grande portée (dimensions) seraient fabriqués par moulage.

Il est à retirer qu'il semble possible de fabriquer le DEPT-VV par un procédé bon marché et industriel : le procédé par presse-vibration tel que proposé en section 2.6.3. Cette hypothèse doit être confirmée par des études sur le sujet qui détermineront si la décomposition du moule est viable et si une composition de béton adaptée, au mieux contenant de l'Argex, pourra être développée.



# Chapitre 3: Développement de GGS associés (Gripping and Guiding Systems)



Construire avec des DEPT nécessite le développement de son système de préhension et de guidage associé (“gripping and guiding system” en anglais, abrégé dans la suite par “GGS”). Pour rappel, c’est l’élément qui fait le lien physique entre le DEPT et le drone qui le transporte.

Comme son nom l’indique, cet élément possède deux fonctionnalités indispensables au bon fonctionnement de la technologie DEPT et GGS associé: la préhension du DEPT et son guidage partiel lors de la pose. D’autres critères entrent également en jeu afin d’obtenir un GGS le plus adapté au DEPT et au système constructif développé, nous les verrons en première partie de ce chapitre.

Des exemples de systèmes de préhension existants ou possibles seront ensuite décrits; reprenant notamment des idées des travaux de A. Naveau et A. Moncourrier (4) ainsi que de ceux de J.-F. Leboutte et V. Parisel (3). Certains seront développés, fabriqués et testés en laboratoire afin d’en établir les avantages et inconvénients fonctionnels.

Le même raisonnement sera appliqué au choix du système de guidage du DEPT lors de la pose, après quoi finalement il sera présenté les possibilités de couplage des systèmes de préhension et de guidage permettant d’obtenir un GGS efficace et ergonomique.

Finalement, nous verrons qu’il est aussi possible d’imaginer des systèmes qui permettent de corriger l’imprécision de pose du drone dans les deux directions.

## 3.1. Cahier des charges

### 3.1.1. Préhension du DEPT et sécurité en vol

Le GGS est le lien physique entre le DEPT et le drone: il doit permettre au drone de saisir le bloc, le soulever, le transporter vers son lieu de pose et finalement le déposer (Figures 116). Le système doit donc pouvoir être enclenché et déclenché à distance depuis la radiocommande du drone ou automatiquement.



Figures 116 - Etapes de préhension, transport et pose de l'élément

Il est également capital d'assurer une sécurité en vol: le GGS ne doit en aucun cas lâcher le bloc en plein transport aérien vers son emplacement. Il faudra pour cela veiller à un système de préhension suffisamment robuste et puissant pour assurer l'arrimage du DEPT: à la masse du bloc s'ajoute la force résultante des accélérations centrifuges subies par le bloc lors des virages en vol (Figure 117). Le surdimensionnement du système permettra de se placer du côté de la sécurité.

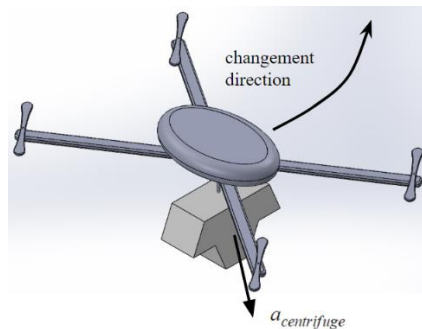
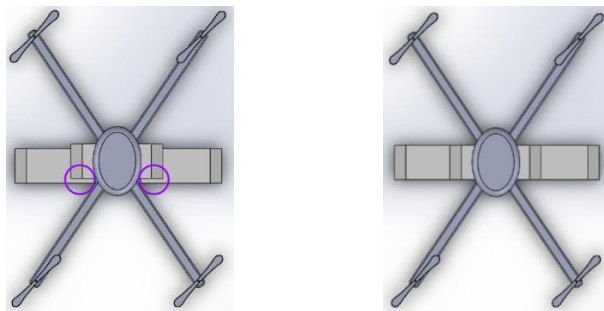


Figure 117 - Accélération subie par le bloc lors de changement de direction du drone

### 3.1.2. Guidage du DEPT lors de la pose et précision

La spécificité de la technologie DEPT/GGS associé est ce nouveau rôle donné au GGS: guider le bloc vers sa position latérale demandée lors de la pose (section 1.4.3.2). L'idée étant en fait de s'appuyer sur les blocs déjà posés précédemment et servant de base au nouveau DEPT placé (Figures 118). Rappelons que l'imprécision à corriger provient de l'imprécision du système de location spatiale du drone et des contraintes extérieures. Elle est évaluée à 5 cm dans le cadre de ce travail (section 2.4.1).



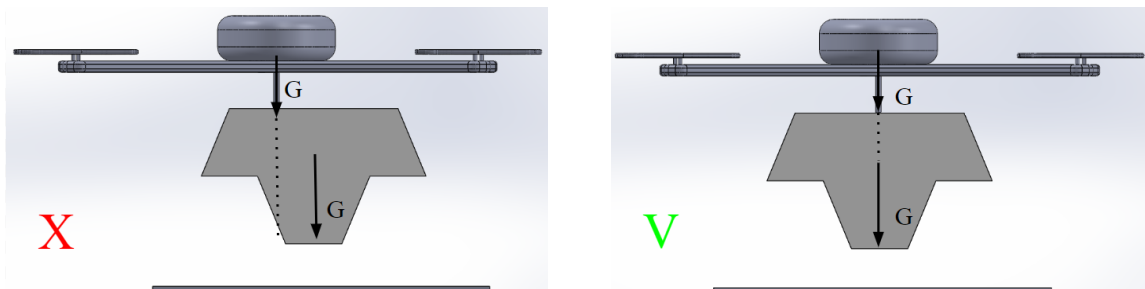
Figures 118 - Correction de l'imprécision de pose latérale par le drone et son GGS

Donc, si le bloc est descendu vers son emplacement avec 5 cm d'imprécision devant ou derrière le mur, le GGS doit jouer son rôle et guider le DEPT vers son emplacement précis.

Une précision maximale est alors requise, puisqu'un décalage de pose dans la direction perpendiculaire à celle du mur peut induire, étage après étage, à un décalage total au sommet du mur inacceptable (Figure 77).

### 3.1.3. Guidage du GGS lors de la préhension et précision

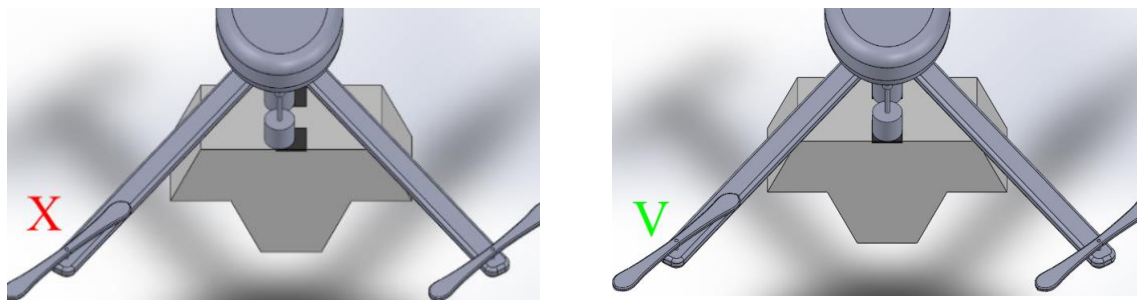
En plus de devoir guider le DEPT lors de la pose, le GGS doit aussi guider le drone vers le bloc à saisir. Ici aussi, le but est de corriger l'imprécision du système de localisation du drone et les contraintes extérieures, évaluée à 5 cm. Il est nécessaire de saisir le bloc en son centre, pour que le centre de gravité soit dans le même axe vertical que celui du DEPT (Figures 119).



Figures 119 - Préhension de l'élément dans le prolongement du centre de masse

Nous le verrons dans la suite de ce travail, ce guidage est bien souvent couplé au guidage lors de la pose du bloc: le même élément constituant du GGS jouera le rôle de guidage latéral en pose et le rôle de guidage latéral et longitudinale lors de la préhension.

De la précision est requise, pour permettre au GGS de jouer son rôle de préhension. Le GGS doit être le mieux placé possible sur le DEPT pour assurer le bon fonctionnement de son système de préhension (Figures 120).



Figures 120 - Mauvaise et bonne préhension de l'élément avec le système de préhension par électro-aimants (éléments noirs = plaquettes métalliques d'attache)

### 3.1.4. Autres critères

#### **Masse**

Lors du développement d'éléments de maçonnerie drone-compatibles, une importance a été donnée à limiter la masse des éléments. Il en est de même pour le GGS: la somme de la masse du DEPT et celle du GGS associé doit être inférieure à la charge utile du drone.

Il faut donc imaginer des GGS légers pour éviter d'utiliser des drones encombrants et coûteux. Il faut privilégier l'utilisation de matériaux légers comme le bois et l'aluminium et minimiser les dimensions des différents éléments composants du GGS.

#### **Consommation d'énergie**

Lorsque des GGS seront développés dans la suite de ce travail, nous verrons que l'enclenchement et le déclenchement du système de préhension nécessitent des organes utilisant de l'énergie électrique (servomoteurs, électro-aimants, etc). Leur alimentation induit l'ajout d'une batterie sur le drone ou le prélèvement dans la batterie du drone lui-même. Affectant par la même occasion le poids du GGS ou l'autonomie du drone.

Il faut donc éviter des GGS trop gourmands en énergie.

#### **Encombrement**

L'encombrement du GGS se caractérise par ses dimensions: largeur, longueur et hauteur. Les largeurs et longueurs sont au minimum celles du DEPT, auxquelles il faut ajouter de chaque côté la valeur de l'imprécision du drone (donc dans notre étude, 5 cm), mais peuvent être bien plus élevées en fonction du système de préhension choisi. La hauteur dépend elle de la hauteur du DEPT et donc des éléments de guidage, et des éléments constituant des systèmes de préhension sélectionnés s'ajoutant la plupart du temps au-dessus du guide.

Ces dimensions sont à limiter pour éviter un trop grand encombrement: on pourra ainsi utiliser et faire fonctionner plusieurs drones sur un chantier sans risque de collision.

#### **Coût**

Il faut viser à obtenir un GGS à faible coût de fabrication: certains systèmes bons marchés sont tout aussi fonctionnels que certains systèmes à coût de montage et d'entretien plus élevés. Cela dit, des milliers de blocs pourront être placés à l'aide d'un seul GGS: raison pour laquelle complexifier le GGS (et donc augmenter son coût) pour simplifier la forme des éléments à poser reste un choix globalement plus économique.

## 3.2. Systèmes de préhension

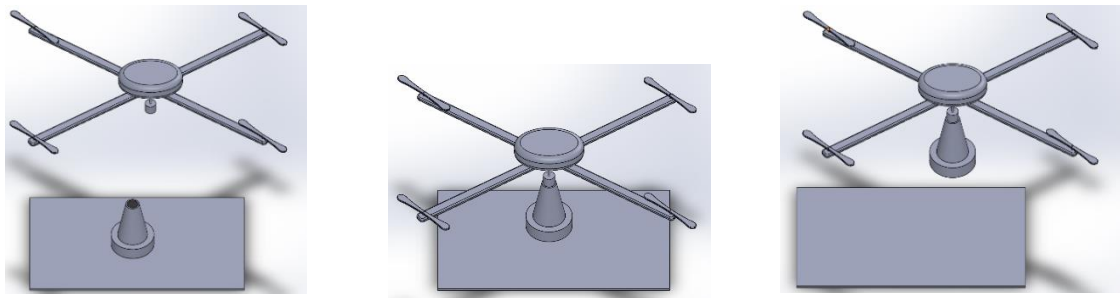
L'imagination, la réflexion voire des essais sur divers types de systèmes de préhension ont déjà été effectués dans les travaux de A. Naveau et A. Moncourrier (4) ainsi que ceux de J.-F. Leboutte et V. Parisel (3). La section ci-dessous résume largement les conclusions de ces travaux, après quoi nous verrons comment appliquer ces systèmes de préhension au DEPT. La fabrication de différents systèmes de préhension sera illustrée en section 4.2.

### 3.2.1. Système à électro-aimants

#### Description

Un premier système de préhension utilise la force électromagnétique pour soulever et transporter les éléments. Une ou plusieurs plaquettes métalliques sont incorporées aux éléments de maçonnerie, tandis qu'un ou des électro-aimants équipe(nt) le GGS. La préhension est donc activée ou désactivée en alimentant ou pas les électro-aimants (Figures 121).

Au moment de saisir le bloc, le(s) électro-aimant(s) n'est (ne sont) plus alimenté(s) et fonctionne(nt) alors comme un (des) aimant(s) et lie(nt) le bloc au drone par force électromagnétique. Lors de la pose, le(s) électro-aimant(s) est (sont) à nouveau alimenté(s) et la force électromagnétique n'agit plus: l'adhérence est rompue, et le drone peut s'envoler sans le bloc.



Figures 121 - Système de préhension par électro-aimants

#### Avantages et inconvénients

Ses avantages sont nombreux:

- simple d'utilisation, que ce soit lors de la préhension ou de la pose de l'élément;
- facile à dimensionner et à fabriquer;
- peu encombrant et relativement léger;
- sûr en vol (force électromagnétique nécessaire à surdimensionner)

Malheureusement, ce système de préhension souffre d'un inconvénient important. Il nécessite la modification des blocs, puisqu'on doit ajouter à chacun d'eux une ou plusieurs plaquette(s) métallique(s). Forcément, cela se répercute sur le coût de fabrication des blocs: coût du métal utilisé, coût de l'incorporation au bloc, coût lié au stockage en endroit sec pour éviter la rouille, etc.

Le GGS équipé de ce système sera abrégé GGS-EM (EM pour "Electro-Magnets"). Pour pouvoir mettre en œuvre ce système pour le DEPT, il faudra ajouter au DEPT des électro-aimants dans leur face supérieure (Figure 122 et voir section 4.1.3.1).

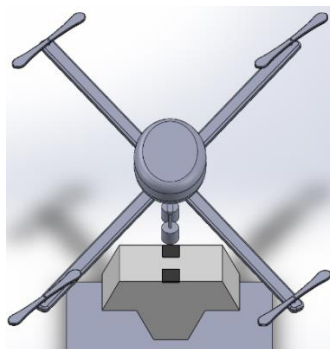


Figure 122 - Drone avec GGS-EM et DEPT équipé de plaquettes métalliques

### 3.2.2. Système à pince de levage

#### Description

Autre système imaginé: l'utilisation d'une pince auto-serrante se refermant sur le bloc. La force de levage dépend alors du frottement existant entre les deux faces de la pince et les parois du bloc, et dépend du poids du bloc soulevé (Figure 123).



Figure 123 – Exemple de pince de levage industriel

La force de frottement obtenue peut être suffisante pour garantir la sécurité de préhension en vol. Si ce n'est pas le cas, un moteur peut être ajouté et ainsi incrémenter la force de frottement existante entre la pince et le bloc.

La pince étant auto-serrante lorsqu'elle est levée vers le haut, il faut prévoir un système évitant le resserrage de la pince lorsque le bloc doit être déposé. Une possibilité d'un tel système, utilisé lors d'essais, sera décrite en section 4.2.3.

#### Avantages et inconvénients

L'avantage majeur de ce système est qu'il ne nécessite pas de modification du bloc à transporter: il s'appuie juste sur ses parois latérales. Le DEPT n'a donc pas à être modifié pour pouvoir être transporté via un système de préhension par pince de levage. Et aucun coût additionnel de fabrication des blocs n'entre alors en jeu. Ensuite, sa consommation en énergie est quasiment nulle, puisque la force de préhension est simplement obtenue par serrage de la pince sous l'action de la gravité. Seul le système anti-resserrage utilisera, on le verra plus tard, une petite quantité d'énergie.

Les inconvénients notables sont l'encombrement d'un tel système, puisque les pinces débordent latéralement. La pose par exemple d'éléments de coin pourrait être plus difficile (Figure 125). Le poids du système peut aussi poser un certain problème. Mais l'utilisation de matériaux légers comme le bois et l'aluminium peut réduire drastiquement le poids du GGS-G (GGS équipé du système à pince de levage, "G" pour "Grabber", pince en anglais).

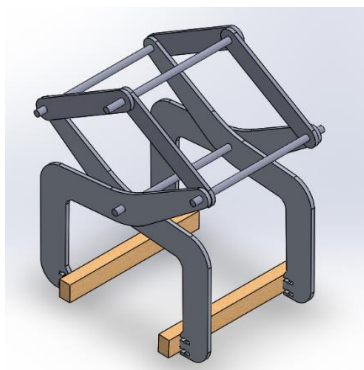


Figure 124 - Exemple de pince de levage à prise rectangulaire

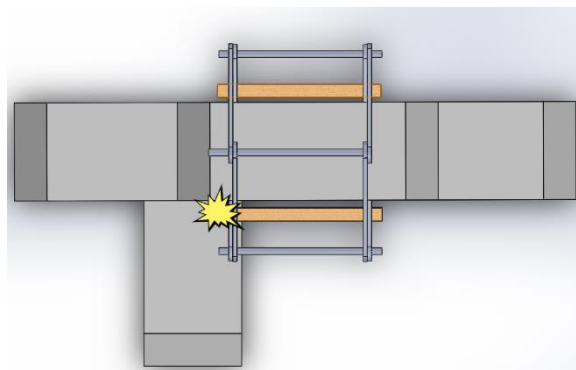


Figure 125 - Encombrement du système lors de l'assemblage d'une jonction de mur

### 3.2.3. Système avec rotation de tiges en forme T

#### Description

La troisième solution imaginée est appelée « T-shaped system ». Il consiste à introduire dans le bloc, à travers une intrusion ajoutée dans le bloc, une tige au bout de laquelle est fixée une extension horizontale (Figure 126).

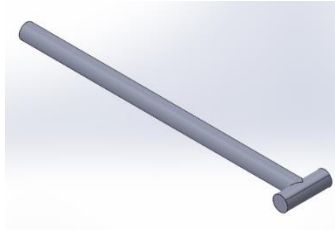
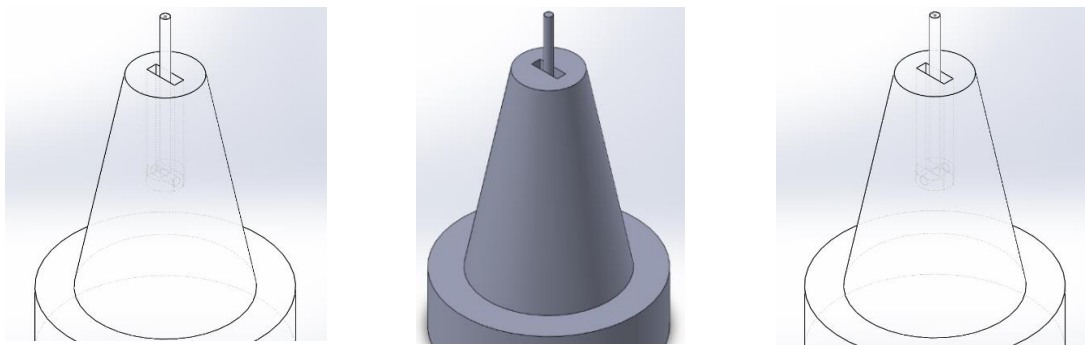


Figure 126 - Tige en forme de "T"

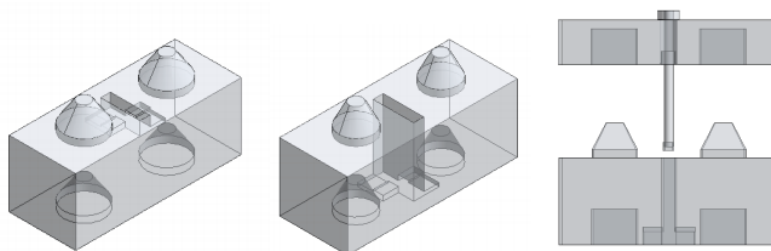
Ensuite, une rotation à 90° de cette tige va induire une rotation à 90° de l'extension horizontale. L'orientation de celle-ci change alors et permet de soulever le bloc lorsque le drone remonte. Le mécanisme est illustré ci-dessous en Figures 127. D'abord, le GGS est descendu en position ouverte dans le bloc, la tige pénètre sans obstruction dans l'intrusion prévue à cet effet. Une fois le drone et le GGS posé sur le bloc, la rotation de la tige place le système en position fermée. Le décollage du drone va faire remonter la tige et son extension horizontale, emportant avec elle le bloc à transporter.



Figures 127 - Mécanisme ouvert et fermé du système à tiges T

#### Avantages et inconvénients

Ce système est simple et efficace, et nécessite peu d'énergie pour son fonctionnement. Son encombrement faible et son poids réduit sont d'autres avantages. Mais le système avec rotation de tige en forme T a un inconvénient: il nécessite la modification du bloc, en y ajoutant une ou plusieurs intrusion(s), qui plus est souvent difficile à mouler (Figures 128).



Figures 128 - Exemple d'élément adapté au système par tiges T

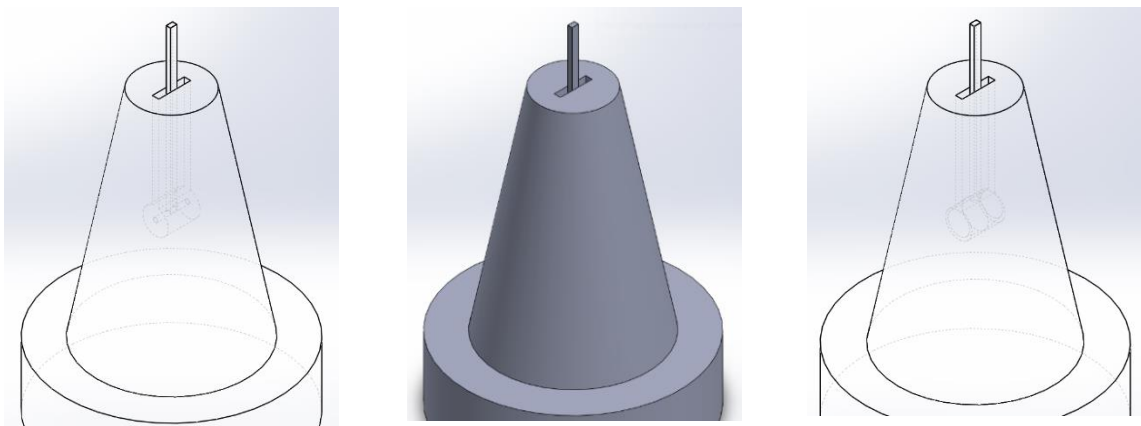
L'application au DEPT peut se faire de plusieurs façons, mais il faudra y ajouter une intrusion. Pour conserver une forme extrudable, on veillera à placer une intrusion elle aussi extrudable. Cela sera décrit

en section 4.1.3.2. Notons que le GGS-T (pour « T-shaped ») sera équipé de 2 tiges en forme de T pour assurer une meilleure stabilité du DEPT en vol.

### 3.2.4. Système à gonflement de membrane

#### Description

Le dernier système de préhension développé ici est le système à gonflement de membrane et est proche du système à tige en forme T. Ici aussi, une tige est descendue au sein du bloc creusé. Au bout de celle-ci, une membrane contractée remplace l'extension horizontale. Cette membrane est ensuite gonflée par air comprimé dans une cavité au sein du bloc pour augmenter son volume. Une fois la membrane gonflée, le bloc est attaché au drone puisque la membrane bloque la remontée de la tige à travers l'intrusion (Figures 129).



Figures 129 - Mécanisme ouvert et fermé du système à gonflement de membrane

Ce système nécessite donc l'utilisation d'air comprimé, stocké sur le GGS dans une bonbonne ou au sol puis relié au GGS par un tuyau d'alimentation. 2 valves sont alors à prévoir: l'une entre la bonbonne et la membrane pour enclencher le gonflement de la membrane, et l'autre entre la membrane et l'extérieure pour déclencher son dégonflement lors de la pose du bloc transporté.

#### Avantages et inconvénients

Les avantages sont pratiquement les mêmes que ceux du système à tige en forme T: facilité d'utilisation, efficacité, peu d'encombrement et poids faible (sauf si la bonbonne est transportée par le drone). Et l'inconvénient est également le même: il faut ajouter une cavité au sein du bloc pour accueillir la membrane gonflée.

Notons également que les blocs peuvent être creusés pour diminuer leur masse (section 2.3). La forme du volume de matière retirée peut avoir une forme propice à l'utilisation par la suite de ce système de préhension à gonflement de membrane.

Ce système n'a pas été développé en laboratoire, en raison de la difficulté de sa mise en œuvre expérimentale. Il ne sera donc pas développé en section 4.2.

### 3.2.5. Résumé

La Tableau 3 résumé les avantages et inconvénients de différents systèmes décrits dans cette section.

| Électro-aimants                          | Pince de levage                      | Rotation de tiges à forme T              | Gonflement membrane                          |
|------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------|
| + dimensionnement et fabrication simples | ++ bloc pas modifié                  | + dimensionnement et fabrication simples | + consommation d'énergie quasi nulle         |
| + encombrement                           | + consommation d'énergie quasi nulle | + consommation d'énergie quasi nulle     | + encombrement                               |
| + poids                                  | - poids                              | + poids                                  | + poids (si bonbonne au sol ou rechargeable) |
| + sécurité                               | - encombrement                       | + encombrement                           | - mise en œuvre en laboratoire               |
| + mise en œuvre en laboratoire           | - sécurité                           | + coût de fabrication                    | - coût de fabrication                        |
| -- adaptation du bloc                    |                                      | -- adaptation du bloc                    | -- adaptation du bloc                        |

Tableau 3 - Avantages et inconvénients des systèmes de préhension

Le système à électro-aimants a été utilisé lors des précédents travaux sur le développement d'éléments de maçonnerie drone-compatibles en laboratoire. Cependant, vu l'importance donné aux GGS dans la technologie du DEPT et de ses GGS associés, les autres systèmes seront développés, fabriqués et testés en laboratoire (excepté le système à gonflement de membrane). Tout cela sera décrit dans le chapitre suivant de ce travail (section 4.2).

## 3.3. Systèmes de guidage (ou systèmes de reprise de l'imprécision latérale de pose du drone)

En fait, l'appellation "système de guidage" provient du système de reprise de l'imprécision latérale de pose du drone choisi, avant une réelle réflexion sur les différentes possibilités existantes pour donner au GGS son rôle de reprise de l'imprécision dans la direction perpendiculaire au sens du mur. C'est pourquoi l'abréviation "GGS" (Gripping and Guiding System) est utilisée dans ce travail. Cela dit, d'autres systèmes existent et peuvent faire à l'avenir l'objet d'essais.

### 3.3.1. Système par guides latéraux

#### Description

Lors de l'imagination de systèmes pour corriger l'imprécision latérale de pose du drone, le système par guides latéraux est celui qui apparaît le plus évident: l'idée étant d'ajouter au GGS des rails de guidage de part et d'autres du bloc à poser (Figure 130).

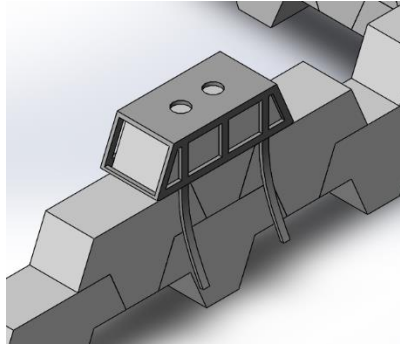
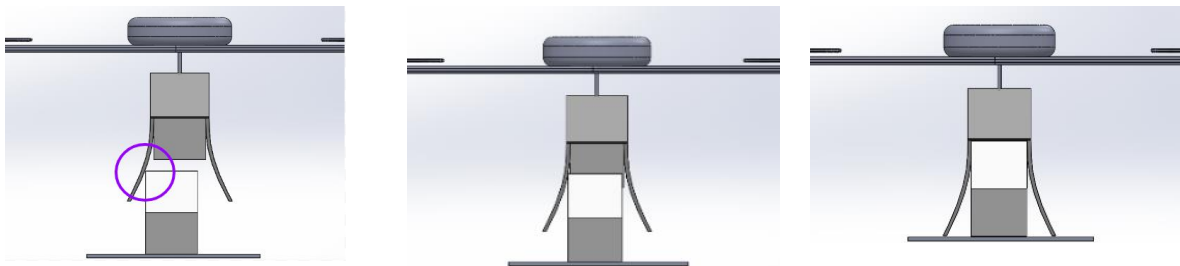


Figure 130 - Système avec rails de guidage latéraux

Le GGS s'appuie alors, lors de la descente progressive du drone et donc du bloc à poser, sur les éléments déjà positionnés en-dessous (Figures 131).



Figures 131 - Correction de l'imprécision de pose latérale par le système à guides latéraux

### Avantages et inconvénients

Ce système est simple à mettre en œuvre puisqu'il ne consiste qu'à ajouter des rails, métalliques ou en bois, de forme inclinée au GGS. Par contre, il vaut veiller à donner une précision maximale afin d'obtenir un écartement des rails de guidage très légèrement supérieur à l'épaisseur du bloc à saisir et poser. Un écartement trop élevé mènera à une imprécision latérale de pose du bloc (Figure 132). Ces rails doivent aussi avoir une rigidité suffisante pour éviter leur déformation et donc une augmentation de leur écartement lors de la pose (Figures 133).



Figure 132 - Imprécision de pose latérale

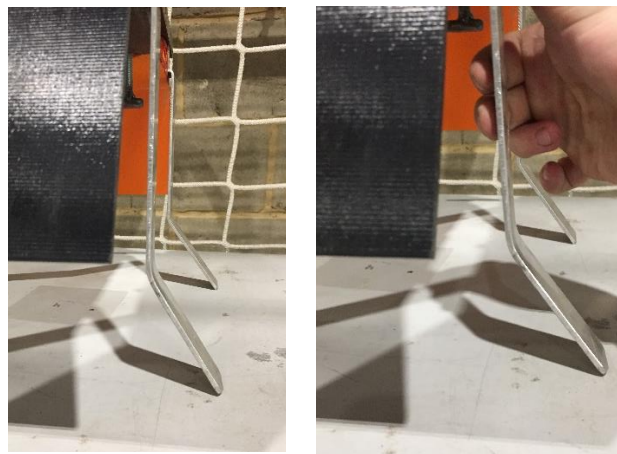


Figure 133 - Déformation des rails de guidage par application d'une force

Le système par guides latéraux sera aussi encombrant que le bloc en question est haut, puisqu'il doit dépasser du bloc pour atteindre et s'appuyer sur les blocs inférieurs. La forme du DEPT aide cependant à limiter cet encombrement en terme de hauteur: les guides sont placés au niveau des ailes. Les rails de

guidage d'une hauteur de la moitié du bloc sont nécessaires pour pouvoir atteindre les DEPT inférieurs (Figure 134). Avantage qui en découle, le DEPT peut être saisi à même le sol, sans devoir être placé sur une plateforme de préhension.

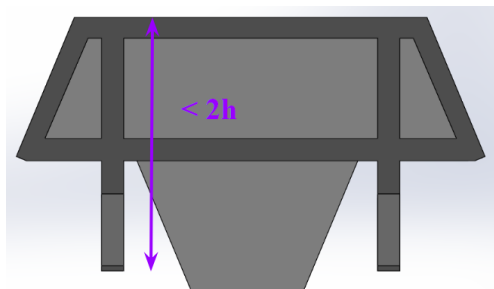
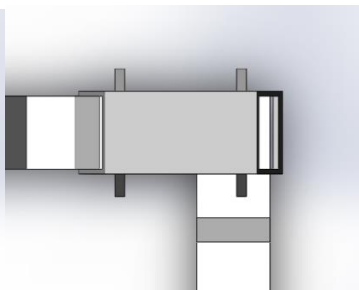
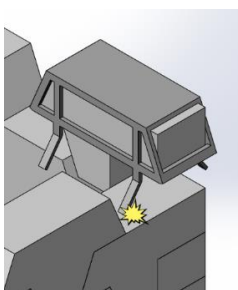
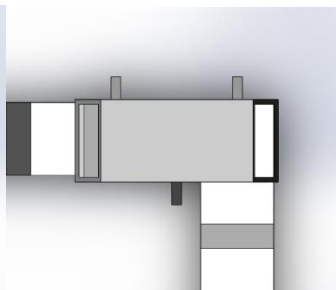
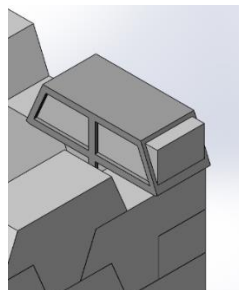


Figure 134 - Hauteur du système de guidage

L'exemple donné en Figures 135 comporte 4 rails de guidage, 2 de chaque côté du DEPT. Cela posera problème lors de la pose de DEPT-c (section 2.5.2). Pour pallier à cela, il est judicieux de ne placer qu'un rail de guidage du côté intérieur du coin (Figures 136).



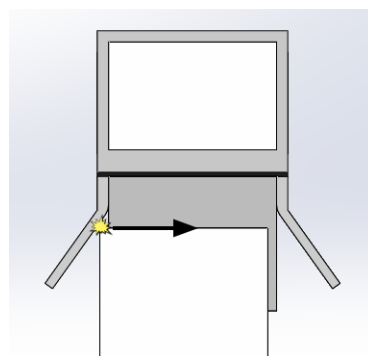
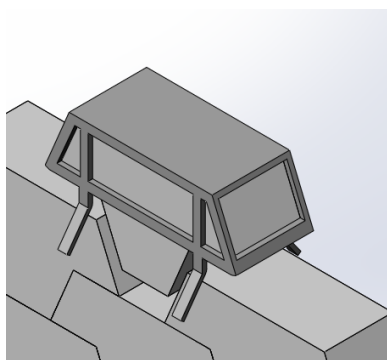
Figures 135 - Obstruction du rail en construction de coin de murs



Figures 136 - Rail de guidage au centre pas obstrué

### Effet sur les blocs inférieurs

En s'appuyant sur les blocs constituant la base de l'emplacement du bloc à poser, il existe un risque de déplacement latéral de ces blocs suite à un choc avec un ou plusieurs rails de guidage (Figure 137). Pour éviter une telle situation menant à une planéité non-respectée du mur en construction, il est nécessaire de mesurer la force maximale d'un tel choc ainsi que la force de frottement statique existante entre les blocs inférieurs et les blocs de l'étage en-dessous de ceux-ci. La comparaison des deux valeurs permettra de savoir si oui ou non un tel risque existe. Notons que l'application d'un mortier-colle entre les blocs, décrit en section 1.4.3.3, peut limiter l'apparition d'une telle situation.



Figures 137 - Risque de déplacement latéral des éléments inférieurs

### 3.3.2. Système par butées verticales latérales

#### Description

Ce système est composé de butées verticales ajoutées au système de préhension d'un seul côté du bloc, qui permettra d'aligner celui-ci avec les blocs inférieurs lors de la pose (Figure 138).

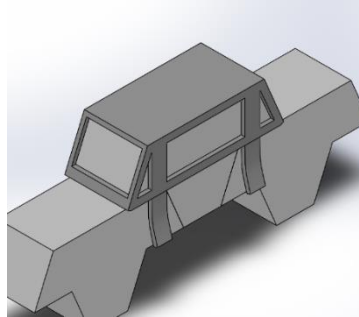
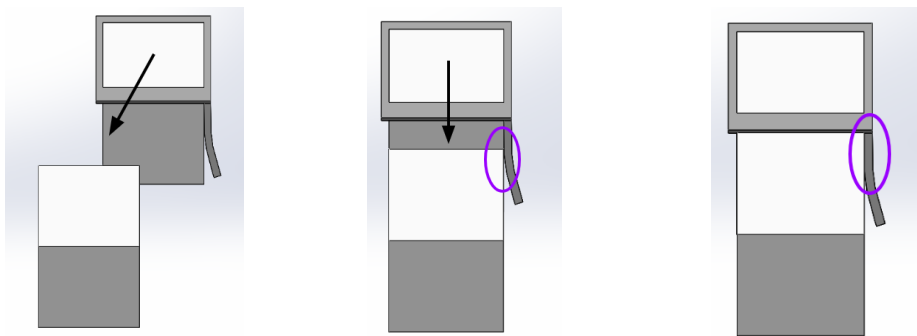


Figure 138 - Système par butées latérales verticales

Le bloc est amené vers son lieu de positionnement par le côté opposé aux butées, qui vont, comme leur nom l'indique, buter sur les blocs inférieurs. Le drone descend alors ensuite tout en maintenant le contact surfacique entre les butées et les blocs inférieurs (Figures 139).



Figures 139 - Fonctionnement du système par butées latérales verticales

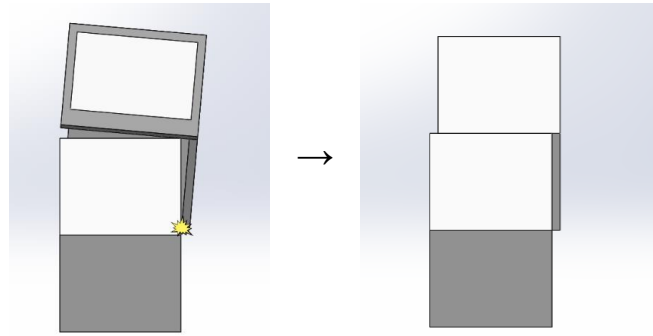
Le maintien de ce contact avec la face latérale du ou des blocs inférieurs est primordial. S'il n'est pas assuré au moment où le bloc se pose, un décalage latéral de pose se présentera (Figure 132).

#### Avantages et inconvénients

Ce système est proche du système à guides latéraux précédemment présenté, et possède donc les mêmes avantages et inconvénients que celui-ci: facilité de fabrication, poids réduit, consommation d'énergie supplémentaire nulle mais encombrement dépendant de la hauteur du bloc et précision difficile à obtenir.

Le plus qu'apporte ce système est sa facilité d'utilisation dans le placement d'éléments de coin ou de jonction de murs, puisque le système n'encombre qu'un côté du bloc à poser.

Cela dit, le bloc doit être parfaitement à l'horizontale lors de la pose pour placer celui-ci sans obtenir de décalage latéral. Si le drone et le bloc sont légèrement inclinés, l'extrémité de la butée sera en contact linéaire avec le(s) bloc(s) inférieurs, menant à une pose imprécise (Figures 140).



Figures 140 - Décalage latéral de pose dû à l'inclinaison du système

### Effet sur les blocs inférieurs

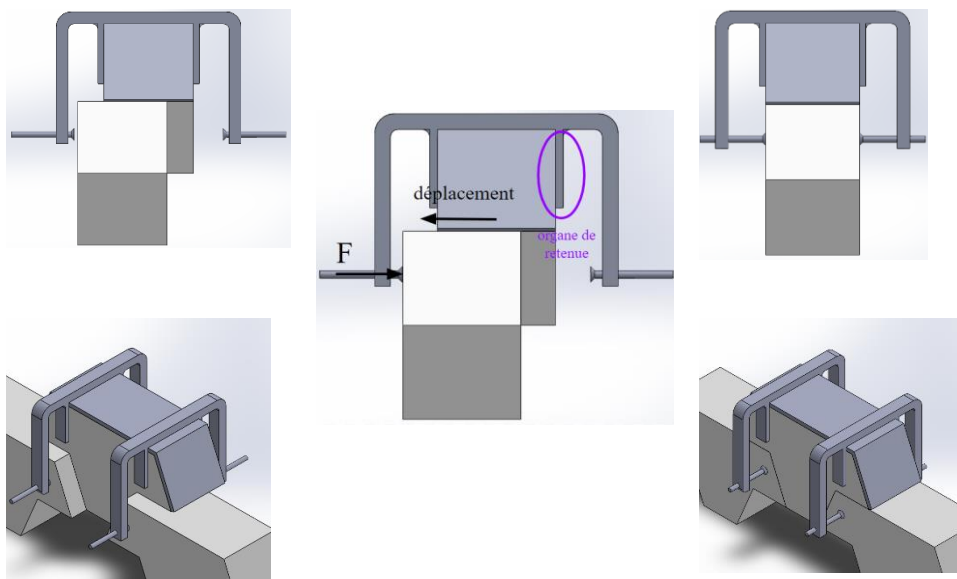
Tout comme expliqué pour les guides latéraux du précédent système, les butées vont entrer en contact avec les blocs inférieurs, induisant potentiellement un déplacement de ceux-ci. Il sera alors utile de calculer les forces en jeu pour établir le risque d'une telle situation.

Rappelons également que pour maintenir le contact surfacique entre butées et face latérale des blocs inférieurs, une force sera maintenue vers le mur lors de la pose du bloc transporté. Cette force, appliquée par les moteurs du drone, devra être dimensionnée et limitée pour éviter de déplacer les blocs inférieurs.

### 3.3.3. Système par serrage postpose

#### Description

Le système suivant corrige l'imprécision latérale de pose après la pose du bloc. Le bloc, une fois posé avec un décalage latéral, va être poussé vers son emplacement final par des vérins ou des tiges filetées. Ils s'appuient sur les blocs inférieurs, poussant le bloc à déplacer (Figures 141).



Figures 141 - Fonctionnement du système par serrage postpose

Le système se compose alors de moteurs développant la force nécessaire à contrer les forces de frottement existantes entre le bloc posé et les blocs inférieurs. Il peut s'agir d'une pince se refermant en

lui fournissant via un moteur au couple suffisant, un système de presse hydraulique ou la rotation des tiges filetées. Le drone devra lui, durant le processus, rester en vol stationnaire (ou posé sur le GGS). Le drone et le système de préhension suivent le déplacement latéral du bloc.

### Avantages et inconvénients

L'avantage principal du système par serrage postpose est sa précision: la presse pourra être refermée au maximum pour réduire l'imprécision latérale de pose à celle de l'imprécision de fabrication de l'épaisseur du bloc.

Mais sa mise en œuvre est plus complexe et son fonctionnement nécessite de l'énergie, électrique ou par système hydraulique. Le poids d'un tel dispositif est un autre inconvénient. Finalement, l'encombrement latéral du système sera plus important que des simples rails de guidage ou des butées comme mentionnés ci-avant (ou la largeur du système vaut  $e + 2t + 2e_{guides} \approx e + 2t$ ). La presse devra en effet avoir une ouverture au minimum plus grande que la largeur du bloc, à laquelle il faut ajouter la valeur de l'imprécision de pose de chaque côté (Figure 142). La largeur du système vaudra alors environ  $e + 2t + 2e_{système} \approx e + 4t$  (estimation).

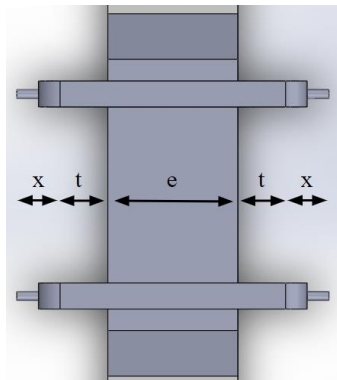


Figure 142 - Largeur du système par serrage postpose

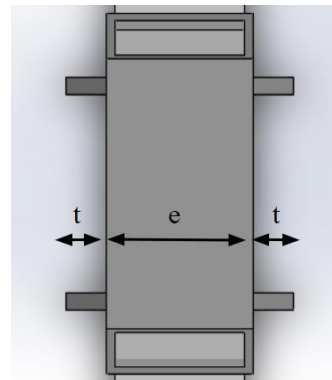
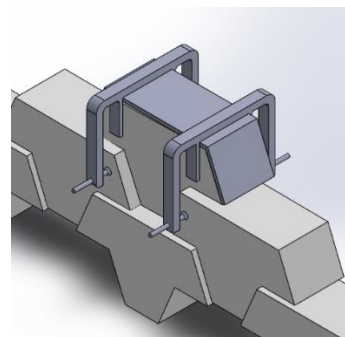
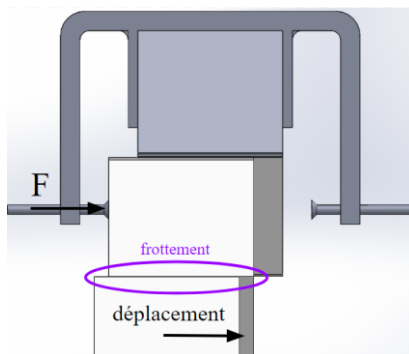


Figure 143 - Largeur du système par guides latéraux

### Effet sur les blocs inférieurs

La presse s'appuie sur les blocs inférieurs lors de sa fermeture. La force de cette presse doit être supérieure à la force de frottement qui règne entre le bloc posé et les blocs inférieurs. On peut alors imaginer que plutôt de déplacer le bloc posé vers sa position finale, la presse induit un déplacement latéral des blocs inférieurs (Figures 144).



Figures 144 - Déplacement latéral des éléments inférieurs

Pour que ce déplacement se produise, il faut donc que la force de la presse soit supérieure à la force de frottement agissant entre les blocs inférieurs et les blocs de l'étage en-dessous  $F_{f,2}$ . Cette force est

simplement deux fois plus élevée que celle entre bloc posé et blocs inférieurs  $F_{f,1}$ , puisqu'elle fait intervenir le glissement simultané de deux blocs.

$$F_{f,1} = \mu * N < F_{f,2} = 2 * \mu * N$$

avec  $\mu$  le coefficient de frottement

Donc, cette situation de déplacement de blocs inférieurs n'est pas possible, puisque le bloc posé se déplacera vers son positionnement final avant d'envisager le déplacement des blocs inférieurs.

### 3.3.4. Amélioration du système par guides latéraux : rainures latérales verticales dans l'élément

Des premiers essais réalisés avec le système par guides latéraux présentent des décalages latéraux de pose provenant de la déformation des rails de guidage utilisés et l'imprécision de fabrication de la dimension  $e$  (section 5.2). Réduire l'espacement entre les rails de guidage augmentent la précision latérale mais bloque cependant la préhension de certains éléments à l'épaisseur légèrement supérieure.

#### Situation en préhension et en pose

Pour assurer la préhension d'un élément par un système équipé de rails de guidage latéral, il faut donc prévoir un jeu de chaque côté de l'élément entre l'épaisseur  $e$  et l'espacement entre les rails de guidage. Ce jeu sera dénommé  $x$  et l'espacement entre les rails  $t$ .

$$t = e + 2x > e \quad (1)$$

Ensuite, lors de la pose du bloc sur des blocs inférieurs, l'espacement  $t$  doit valoir au maximum celle de l'épaisseur  $e$  pour garantir un décalage latéral quasiment nul.

$$t \leq e \quad (2)$$

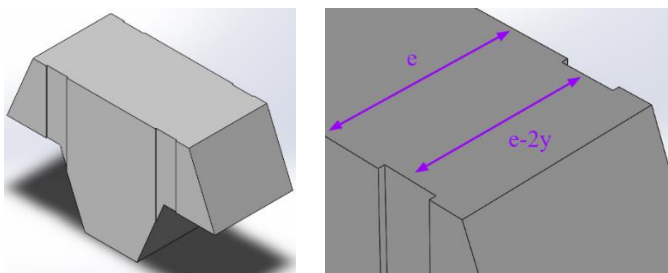
Les deux principes sont donc contradictoires.

#### Ajout de rainures verticales dans les faces latérales

L'idée est de donner à l'élément des épaisseurs différentes ; une là où les rails de guidage s'insèrent lors de la préhension (respect de (1)) et une là où s'appuie le guide lors de la pose d'éléments supérieurs (respect de (2)).

Des rainures verticales de profondeur  $y$  sont ajoutées dans les faces latérales des éléments, réduisant par endroit leur épaisseur à  $e - 2y$  (Figures 145). En parallèle, l'espacement entre les rails de guidage  $t$  est légèrement modifié : il est raccourci de  $2y$ , puis allongé de  $2x$  pour assurer le jeu nécessaire à la préhension (Figure 146).

$$t = e - 2y + 2x \quad (3)$$



Figures 145 - Rainures verticales dans l'élément

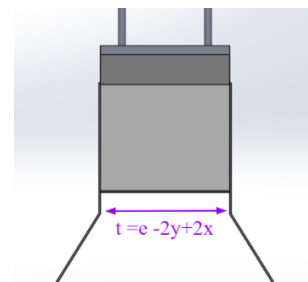


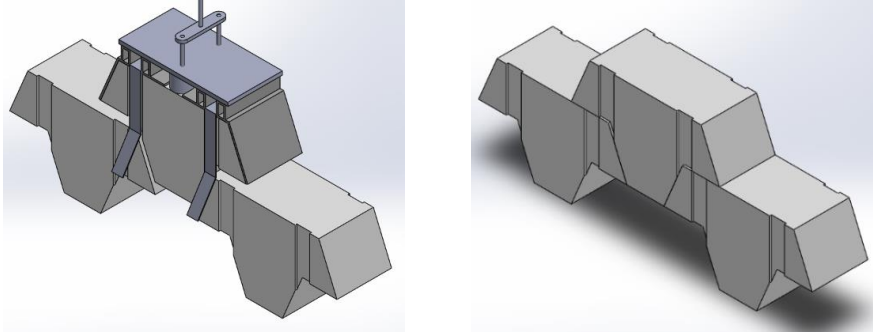
Figure 146 - Raccourcissement de l'espacement entre les rails de guidage

On déduit alors des équations (2) et (3)

$$t = e - 2y + 2x \leq e \Leftrightarrow y > x$$

La préhension sans blocage est alors assurée grâce au jeu  $2x$  existant entre épaisseur de l'élément et espacement entre les rails de guidage ( $e - 2y < e - 2y + 2x$ ). Les rails glisseront dans les rainures prévues à cet effet.

Lors de la phase de pose de l'élément, les rails de guidage vont s'appuyer sur les éléments inférieurs, où l'épaisseur est égale à  $e$  (puisque les rails de guidage ne sont plus alignés avec les rainures des éléments inférieurs, Figures 147).



Figures 147 - Décalage des rainures en pose

Un blocage du système doit alors se produire puisque l'espacement entre les rails de guidage est inférieur ( $t = e - 2y + 2x < e$ ). Mais les rails ne sont pas infiniment rigides : ils peuvent se déformer sous l'action d'une force latérale (Figure 148).



Figure 148 - Déformation des rails de guidage sous force latérale

### Situation en préhension et en pose avec les améliorations

En préhension, les guides rentreront donc dans les rainures grâce au jeu prévu. Un éventuel contact avec une paroi du bloc pourrait cependant avoir lieu : l'élément exercera une force de réaction  $F_{réaction,1}$  sur le rail en contact. Celle-ci dépend de la force exercée par le rail sur l'élément, elle-même proportionnelle à la somme des poids du drone  $P_{drone}$  et du GGS  $P_{GGS}$ .

$$F_{réaction,1} = f(F_1 \propto P_{drone} + P_{GGS})$$

La déformation du rail  $\delta_{rail,1}$  résultante dépend alors de cette force et de la rigidité du rail  $E_{rail}$ .

$$\delta_{rail,1} = g(F_{réaction,1}, E_{rail})$$

On tendra à diminuer au maximum ce déplacement pour que l'élément soit saisi au centre du système de préhension.

En pose, l'espacement  $t$  est obligatoirement inférieur à l'épaisseur des éléments inférieurs. Un contact aura donc lieu et le même type de force de réaction, noté ici  $F_{réaction,2}$ , exercée par l'élément inférieur sur le rail de guidage. Mais le poids total dont dépend cette force est plus élevée puisqu'un élément est transporté par le drone ( $P_{élément}$ ).

$$F_{réaction,2} = f(F_1 \propto P_{drone} + P_{GGS} + P_{élément})$$

Et donc,

$$\delta_{rail,2} = g(F_{réaction,2}, E_{rail})$$

Or, on sait que l'augmentation de  $F_i$  induit l'augmentation de  $F_{réaction,i}$  et donc de  $\delta_{rail,i}$ . Donc, puisque  $F_2 > F_1$ ,  $F_{réaction,2} > F_{réaction,1}$ , et finalement  $\delta_{rail,2} > \delta_{rail,1}$ .

Les guides devront alors avoir une rigidité suffisante pour ne pas trop se déformer lors de la préhension du bloc, sans être trop rigides permettant leur légère déformation lors de la pose et ainsi la mise en place de l'élément.

Un schéma du principe est présenté en Figure 149.

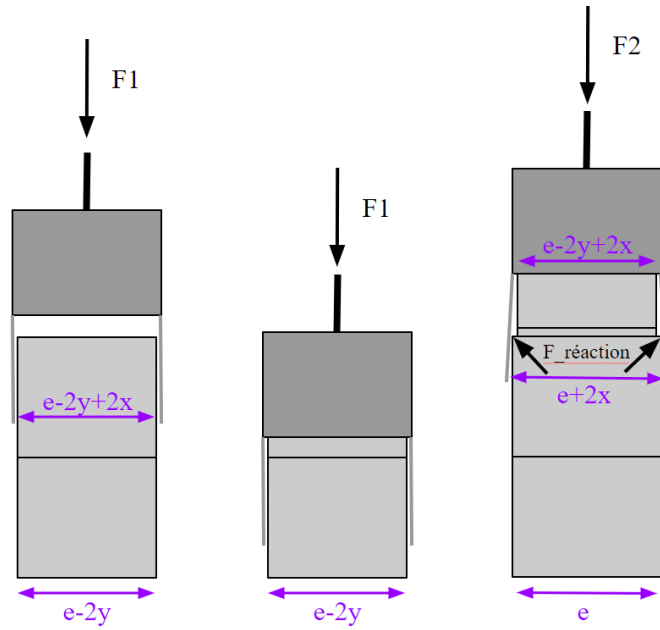


Figure 149 - Principe du rainurage des éléments

Il est donc possible de jouer sur 3 facteurs : le jeu  $x$  ; la profondeur des rainures  $y$ , et la rigidité des rails de guidage  $E_{rails}$ .

La fabrication d'éléments équipés de rainures verticales est donnée en section 4.1.3.4 et des essais sur le système décrit ici sont présentés en section 5.2.3.

### 3.3.5. Résumé

Le Tableau 4 reprend l'ensemble des avantages et inconvénients notables des différents systèmes de reprise de l'imprécision latérale de pose imaginés.

| Guides latéraux                                      | Butées verticales latérales                                 | Serrage postpose                                        |
|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| + mise en œuvre                                      | + mise en œuvre                                             | ++ précision                                            |
| + consommation d'énergie nulle                       | + consommation d'énergie nulle                              | + déplacement latéral des blocs inférieurs pas possible |
| + poids                                              | + poids                                                     | - mise en œuvre                                         |
| + pose simple                                        | - pose par un côté et avec contact blocs/butées à maintenir | - consommation d'énergie non-négligeable                |
| - déplacement latéral des blocs inférieurs possibles | - déplacement latéral des blocs inférieurs possible         | - poids                                                 |
| - précision                                          | -- précision                                                | - temps de pose                                         |

Tableau 4 – Avantages et inconvénients des systèmes de correction de l'imprécision latérale de pose

Comme expliqué en introduction de cette section, le système par guides latéraux a été choisi pour les essais en laboratoire, étant le plus simple à mettre en œuvre et à utiliser lors de la pose de DEPT.

## 3.4. Couplage des systèmes de préhension et des systèmes de guidage pour le DEPT

Un système de préhension et un système de reprise de l'imprécision latérale de pose sont choisis et couplés pour former un GGS, qui jouera les rôles mentionnés en section 3.1.1 à 3.1.3 et tiendra compte des autres critères de conception décrits en section 3.1.4.

Dans bien des cas, l'addition des deux systèmes sur un dispositif peut se faire par complémentarité, en utilisant l'un des éléments du système de préhension comme support d'éléments du système de reprise d'imprécision latéral de pose.

Le système par guides latéraux est celui choisi bien avant la réflexion plus poussée autour des autres possibilités décrites ci-avant. Cette section illustrera comment ont été couplés les 3 systèmes de préhension étudiés (à électro-aimants, à pince de levage et à tiges en forme T) avec le système de reprise d'imprécision latérale de pose à guides latéraux. Les 3 GGS ainsi imaginés et dessinés sur SolidWorks seront ensuite fabriqués à taille réelle en vue d'effectuer des essais permettant potentiellement leur validation.

### 3.4.1. GGS-EM

Le GGS-EM couple le système de reprise d'imprécision latérale de pose à guides latéraux et le système de préhension à électro-aimants (Figure 150).

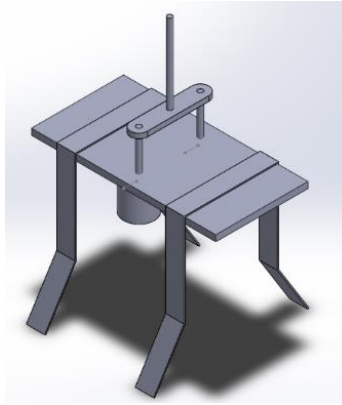
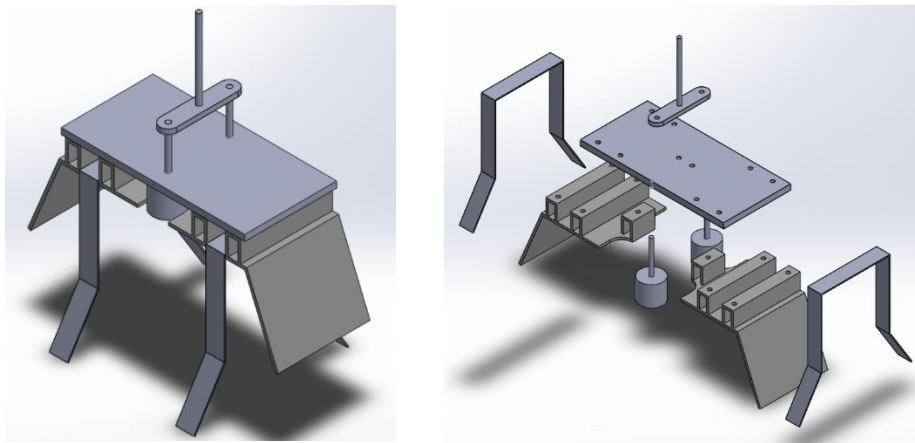


Figure 150 - Couplage électro-aimants/guides latéraux

Les électro-aimants sont placés dans la partie supérieure du GGS-EM, puisqu'ils se connectent aux plaquettes métalliques placées sur la face supérieure du DEPT. Les rails de guidage latéraux se placent eux sur le côté du GGS pour jouer son rôle de reprise d'imprécision à la fois lors de la pose du DEPT mais aussi lors de sa préhension. Les deux systèmes sont donc couplés sans s'obstruer.

Cela dit, la reprise de l'imprécision dans le sens longitudinal du bloc lors de la préhension n'est pas encore assurée. Il faut donc ajouter un élément au GGS qui corrigera le positionnement du drone au moment de saisir le DEPT. Cet élément se constitue de guides composés de faces inclinées de chaque côté. Ainsi, le drone descend sur le DEPT en s'appuyant latéralement sur les rails de guidage du système de reprise de l'imprécision latérale de pose et longitudinalement sur les guides ajoutés.

Un élément est ajouté pour faire le lien entre ces trois parties du GGS-EM (électro-aimants, rails de guidage latéraux et éléments de guidage longitudinal), mais aussi avec le drone lui-même (Figures 151).



Figures 151 - GGS-EM et ses composants

En laboratoire, les rails de guidage seront fabriqués avec des plaques en acier pliés. Les éléments de guidage longitudinal sont imprimés en 3D, mais peuvent également être fabriqués en bois. Le tout est assemblé à une plateforme en bois qui joue le rôle de lien entre tous ces composants (voir section 4.2.2).

### 3.4.2. GGS-G

Le GGS-G, couplant système à guides latéraux au système à pince de levage (d'où "G" pour "Grabber"), est différent. La pince de levage se referme sur les faces latérales du DEPT, là où sont placés les rails de guidage dans le GGS-EM. Les deux systèmes doivent alors se compléter: on va ajouter à la pince de levage des extensions qui joueront le rôle de guides latéraux. Ainsi, une fois le système de préhension

en position fermé, les guides latéraux seront à l'écartement nécessaire et guideront latéralement le DEPT à poser (Figures 152).

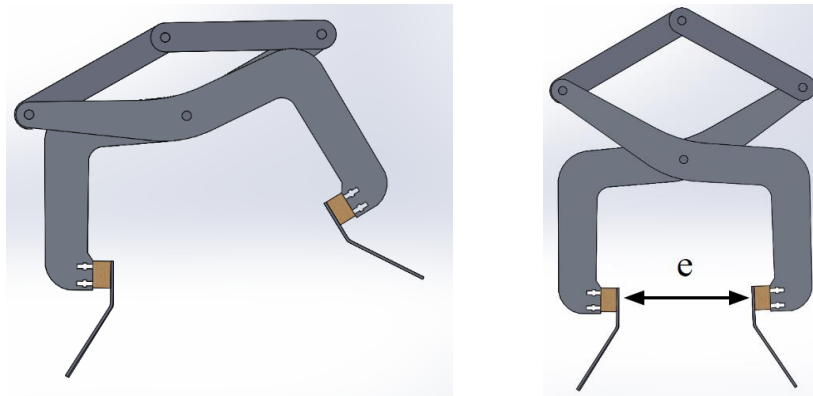


Figure 152 - Ecartement de la pince en position ouverte et fermée

Comme dans le cas du GGS-EM, il est nécessaire d'ajouter des éléments pour guider le drone et le dispositif vers la position longitudinale de préhension du DEPT. Ces éléments sont fixés à l'axe de la pince de levage, qui constitue l'élément lien entre les différentes pièces du GGS-G (Figure 153).

Par contre, les rails de guidage latéraux fixés à la pince ne peuvent jouer le rôle de guidage lors de la préhension du DEPT, puisque le système est alors en position ouverte, et les guides latéraux à écartement plus élevé (Figure 152). Il faut donc ajouter au GGS-G des éléments qui permettront de guider latéralement le drone et le dispositif à la position de préhension du DEPT. Pour cela, il suffit d'ajouter des faces inclinées aux éléments de guidage longitudinal (Figure 154).

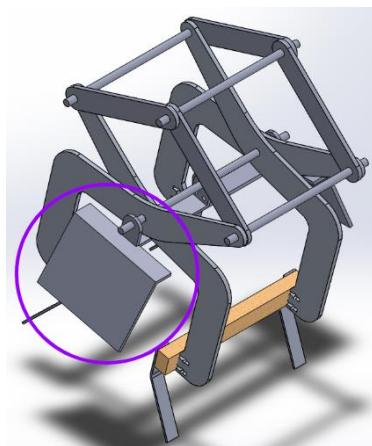


Figure 153 - Intégration des éléments de reprise d'imprécision longitudinale en préhension

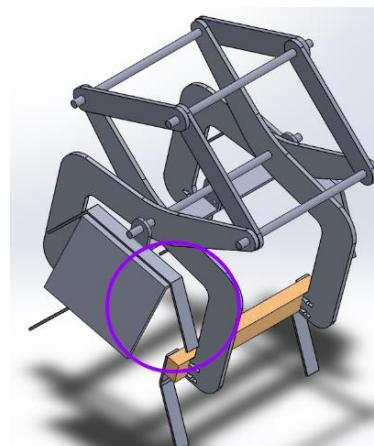


Figure 154 - Intégration des éléments de reprise d'imprécision latérale en préhension

La fabrication complète de la pince de levage et des éléments de guidages seront illustrées et expliquées en section 4.2.3.

### 3.4.3. GGS-T

Le couplage système de préhension par rotation de tige en forme T et système de reprise d'imprécision de pose par guides latéraux est très similaire à celui avec le système de préhension à électro-aimants. En effet, le système à tiges de forme T se place dans la partie supérieure du GGS-T. Le dispositif qui met en rotation les tiges se place juste au-dessus des intrusions placées dans les DEPT qui permettent d'accueillir les tiges lors de la préhension (Figure 155).

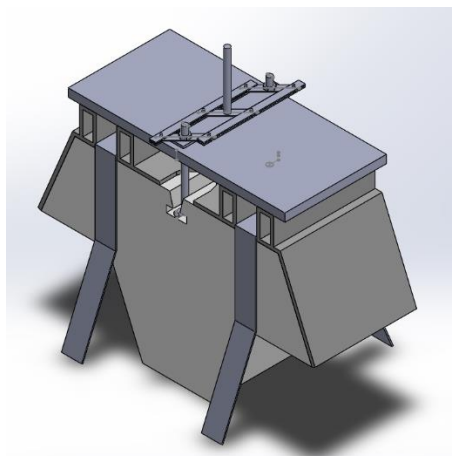


Figure 155 - Couplage rotation de tiges T/guides latéraux

Les deux systèmes ne se gênent pas non plus dans ce cas, et il suffit donc de prévoir comme en section 3.4.1 des éléments de guidage longitudinaux et un élément liant tous les organes du GGS-T.

La section 4.2.4 décrit toute la fabrication du GGS-T utilisé lors d'essais en laboratoire.

## 3.5. Système de guidage latéral et longitudinal

Le développement du DEPT et des GGS ci-avant ont été permis grâce à l'idée du déplacement de la complexité de l'élément de maçonnerie drone-compatible vers son système de pose. Le système de pose a donc le rôle de corriger l'imprécision de pose dans la direction perpendiculaire au mur. On considère alors le transfert « d'un degré de complexité ».

Cependant, il pourrait être intéressant d'envisager un transfert de deux degrés de complexité : un système de pose qui corrigerait l'imprécision de pose dans la direction perpendiculaire au mur et dans la direction parallèle au mur. Ce type de système rendrait alors possible l'assemblage par drones d'éléments de maçonnerie à la forme bien plus proche de celle des éléments de maçonnerie traditionnelle (Figure 156).

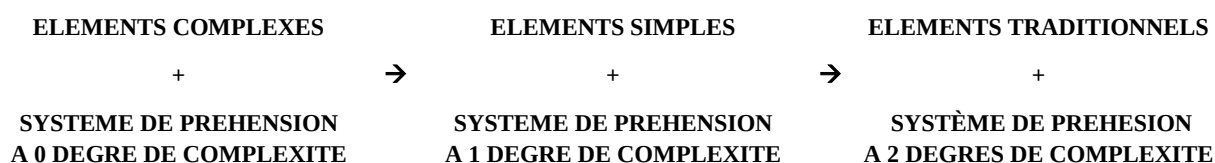


Figure 156 - Transfert de la complexité

La forme rectangulaire des éléments de maçonnerie traditionnelle n'aurait alors pas à être profondément modifiée ; le système de pose s'occuperait directement de mettre en place avec précision le bloc à son emplacement.

Cela dit, pour envisager une telle technologie, il faut développer le système correspondant, alors dénommé GCGS (« Gripping and Complete Guiding System »).

L'idée proposée dans cette section ne sera pas développée et testée dans le cadre de ce travail, mais une possibilité de GCGS a tout de même été imaginée et y est décrite.

Le système imaginé est illustré en Figure 157.

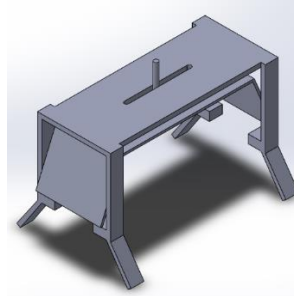


Figure 157 - GCGS imaginé

Celui-ci doit être capable de se poser sur les éléments déjà placés, servant d'appuis lors de la mise en place de l'élément transporté. On ajoute alors des « pieds » équipés de rails de guidage latéraux. En se posant sur les blocs inférieurs, le GCGS corrige déjà l'imprécision latérale puisque le bloc est aligné avec le GCGS (Figure 158).

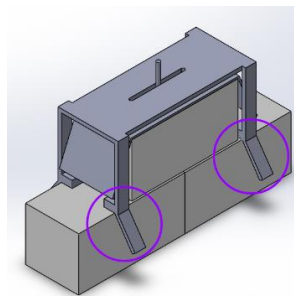


Figure 158 - Rails de guidage latéral en pose du GCGS

Une fois le GCGS posé sur les blocs inférieurs, le bloc transporté n'est pas encore en contact avec ceux-ci. Le GCGS est posé avec une imprécision longitudinale (Figure 159). Le GCGS va pouvoir déplacer dans ce sens l'élément grâce à un moteur qui tire le système de préhension à travers une fente du système de pose (Figure 160). Grâce à des capteurs, le système peut calculer le décalage longitudinal à résorber et ensuite déplacer l'élément vers sa position affectée. Il suffit ensuite de descendre le bloc sur l'étage de bloc inférieur (Figure 161).

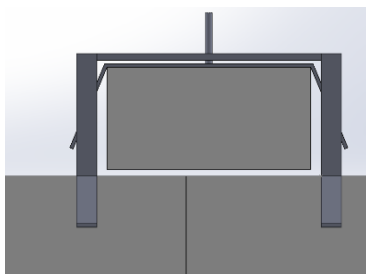


Figure 159 - Imprécision de pose longitudinale

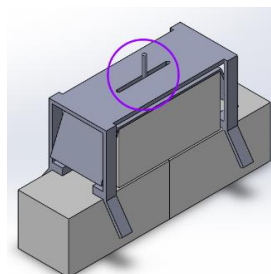


Figure 160 - Fente de glissement dans le GCGS

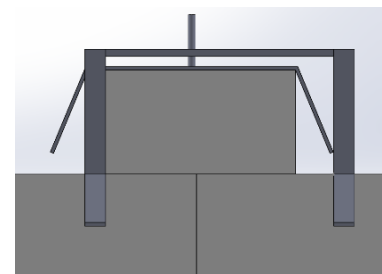
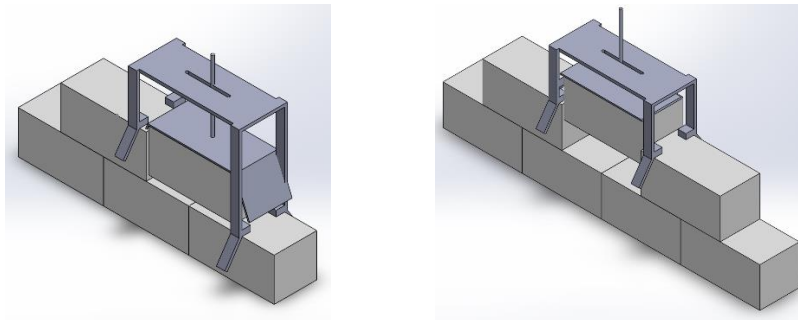


Figure 161 - Pose de l'élément à sa position souhaitée

Le système peut ensuite être adapté pour placer des éléments à côté de son voisin ou entre ses voisins (Figures 162).



*Figures 162 - GCGS dérivés permettant divers types de pose*

A l'avenir, l'étude et le développement de GCGS fonctionnels et efficaces pourraient être effectués et mèneraient alors à l'utilisation d'éléments de forme quasi similaire à celle connue en maçonnerie traditionnelle.

# Chapitre 4: Fabrication des DEPT et des GGS d'essais



L'étape essentielle pour valider la typologie du Drick Extrudable Progressive Triangular ou DEPT est la phase d'essais grandeur nature. Avant la réalisation de ces essais décrits dans le chapitre 5, il est nécessaire de fabriquer des DEPT d'essais ainsi que les GGS associés développés précédemment. Ce chapitre décrit ainsi les étapes de réalisation de DEPT d'essais et la fabrication des 3 GGS qui seront expérimentés.

D'abord, il sera question de la fabrication des blocs de tests, dont les dimensions ont été établies en section 2.4. Partant de peu de connaissance et d'expérience dans la fabrication de blocs en béton en laboratoire, les premières étapes présentées ici regorgent de défauts de réalisation des DEPT d'essais. Au final, plusieurs moules ont été fabriqués pour permettre la fabrication de blocs de manière plus efficace, rapide et précise. La composition de béton utilisée y sera également décrite.

Ensuite, la fabrication des systèmes de préhension et de guidage développés sera exposée. Les GGS se composent en effet de plusieurs éléments aux rôles divers mais tous essentiels à l'obtention de systèmes fonctionnels.

## 4.1. Fabrication des DEPT d'essais

Pour fabriquer les premiers blocs d'essais, il a fallu imaginer un moule à la fois précis et ergonomique et choisir une composition de béton adaptée. Les DEPT jouissant d'une forme simple, leur fabrication a été faite par moulage dans de simples moules en bois. Nous le verrons ci-après, obtenir une précision optimale avec de tels moules n'est pas aisé et mènera à des imprécisions dimensionnelles à la conséquence importante sur l'assemblage des blocs.

Des modifications des moules devront également être apportés pour fabriquer des DEPT d'essais adaptés à certains GGS.

### 4.1.1. Réalisation de moules et coulage de premiers blocs

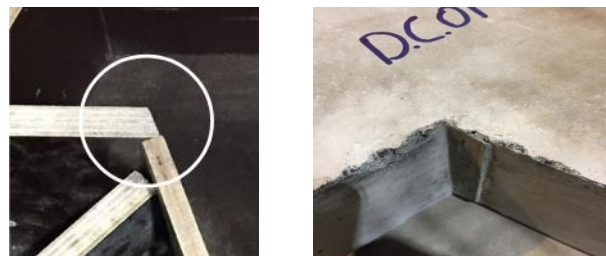
#### 4.1.1.1. Moule 1

Le premier moule assemblé permet de couler un seul bloc sur sa tranche. Des plaques de coffrage ont été découpées et ponçées avec une précision maximale mais à la limite du matériel disponible en laboratoire (scie à bande, ponceuse à ruban); le but étant d'obtenir un sarcophage aux dimensions intérieures du bloc d'essai voulu (Figures 163). Des renforts triangulaires ont été ajouté pour éviter des déformations des plaques de coffrage lors du remplissage du moule par le béton.



Figures 163 - Moule 1

La principale difficulté dans la fabrication de ce moule est l'obtention d'une précision acceptable des angles donnés aux plaques de coffrage. Ces angles sont obtenus par ponçage sur une ponceuse à ruban disponible au laboratoire LEMSC<sup>2</sup>. Une face du moule se compose de deux plaques, nécessitant la précision dans leur réalisation et leur alignement (Figure 164a). Les premiers blocs coulés avec ce moule mettront en évidence la difficulté d'obtenir une finition parfaite à cet endroit du moule, une fois rempli de béton.



Figures 164 - Mauvais alignement de plaques de coffrage (a) et défaut de bloc résultant (b)

La Figure 164b nous montre le défaut obtenu sur les blocs moulés avec le moule 1. Les faces défectueuses sont les faces de glissement, donnant donc lieu à l'obstruction de l'assemblage des

---

<sup>2</sup> Laboratoire d'Essais Mécaniques, Structures et Génie Civil (UCL-IMMC, Place du Levant 1, BE1348 Louvain-la-Neuve)

éléments. C'est la raison pour laquelle il était important d'y remédier. Le second moule corrigera cela en déplaçant le problème vers les ailes (voir section 4.1.1.2).

Ce type de moule possède également l'inconvénient d'être fragile au moulage/démoulage. En effet, le moule doit être démonté presque en intégralité à chaque démoulage de bloc. Le temps nécessaire au montage/démontage du moule est handicapant; mais mène surtout à la dégradation des éléments du moule. Le bois gonfle avec l'humidité à chaque coulage de bloc et souffre du placement répété des vis assemblant les plaques de coffrages (Figures 165).



*Figures 165 - Dégradation des plaques de coffrage*

En vue de diminuer les pertes de temps qu'induisent un tel moule, le moule 2 a été fabriqué.

#### 4.1.1.2. Moule 2

Le moule 2 est très similaire. Les blocs sont toujours coulés sur leur tranche, et le moule se compose de plaques de coffrage poncées dans les angles. 4 blocs sont maintenant coulés à la fois (Figure 166).



*Figure 166 - Moule 2*

Le défaut de non-planéité des surfaces inférieures de glissement décrit en section 4.1.1.1 a été corrigé en inversant la plaque de coffrage couvrant l'autre. Cette légère non-planéité touche maintenant les faces dites des "ailes" des blocs, ce qui ne pose pas de problème lors de la pose des blocs (Figures 167).



*Figures 167 - Transfert du défaut de non-planéité*

Cependant, la fabrication de DEPT avec le moule 2 induit les mêmes inconvénients importants qu'avec le moule 1: imprécisions dimensionnelles des blocs, dégradation du moule suite au montage/démontage et rendu de surface d'une face latérale très mauvais. Ce dernier point est la conséquence d'un coulage des blocs sur leur tranche: les billes d'Argex contenue dans le mélange remonte en fait lors de la mise en vibration par aiguille vibrante du béton coulé (Figures 168).



*Figures 168 - Remontée des billes d'Argex lors du coulage*

Les premiers tests manuels ont ensuite été réalisés avec les blocs coulés avec les moules 1 et 2. Ces tests ont fait apparaître l'importance d'obtenir des dimensions plus précises des DEPT d'essai et surtout de pallier au mauvais rendu de surface d'une face latérale.

L'épaisseur est en fait une dimension à soigner: une épaisseur trop élevée empêchera le bloc de glisser dans le guide (Figure 169), tandis d'une épaisseur trop faible compliquera l'obtention d'une précision de pose du bloc dans la direction latérale (Figure 170).



*Figure 169 - Cas épaisseur trop élevée*



*Figure 170 - Cas épaisseur trop faible*

Il était donc indispensable d'imaginer et fabriquer un nouveau moule qui corrigera ces défauts de fabrication.

#### 4.1.1.3. Moule 3

Le troisième moule profite en fait du caractère extrudable du DEPT: les blocs sont coulés en série dans leur direction latérale. Cela permet d'obtenir une précision de l'épaisseur du bloc bien plus acceptable qu'avec les précédents moules (Figure 171).



*Figure 171 - Moule 3*

Le moule se compose en fait de plaques de coffrage découpées de la forme de la tranche du bloc. Une fois ces plaques découpées avec précision, d'autres plaques de coffrage rectangulaire et donc simples à fabriquer sont ajoutées pour fermer le moule. Le face victime de la remontée des billes d'Argex n'est alors plus une des deux faces latérales mais la base du bloc (Figure 172).

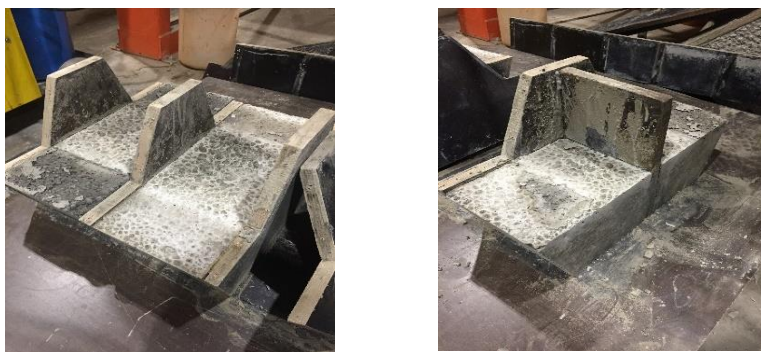


*Figures 172 - Fabrication du moule 3*

L'autre avantage d'un moule de ce type est sa facilité et rapidité de montage/démontage. Les plaques de coffrage de la forme des tranches et vissées à 15 cm l'une de l'autre (majorés de l'épaisseur d'une plaque de coffrage) ne doivent pas être démontées à chaque démoulage de bloc. Le bloc coulé est en fait tiré latéralement après le démontage des autres plaques de coffrage.

La robustesse du moule évite sa dégradation après plusieurs processus de moulage/démoulage et permet donc de conserver la précision des dimensions des blocs coulés.

Deux autres avantages apparaissent également. D'abord la facilité de placer les éléments additionnels aux moules en fonction du type de DEPT à couler (DEPT-EM et DEPT-T), illustré en section 4.1.3. Et ensuite la possibilité de couler des blocs de base d'essai (appelés DEPT-b dans la section 2.5.1) sans devoir modifier le moule (Figures 173).



*Figures 173 – Fabrication des DEPT de base d'essais*

Les tests manuels effectués avec des blocs fabriqués avec le moule 3 ont cependant mené au même constat, certes atténué, qu'avec les moules précédents: l'importance d'obtenir une précision dimensionnelle des blocs encore plus élevée (section 5.2.4).

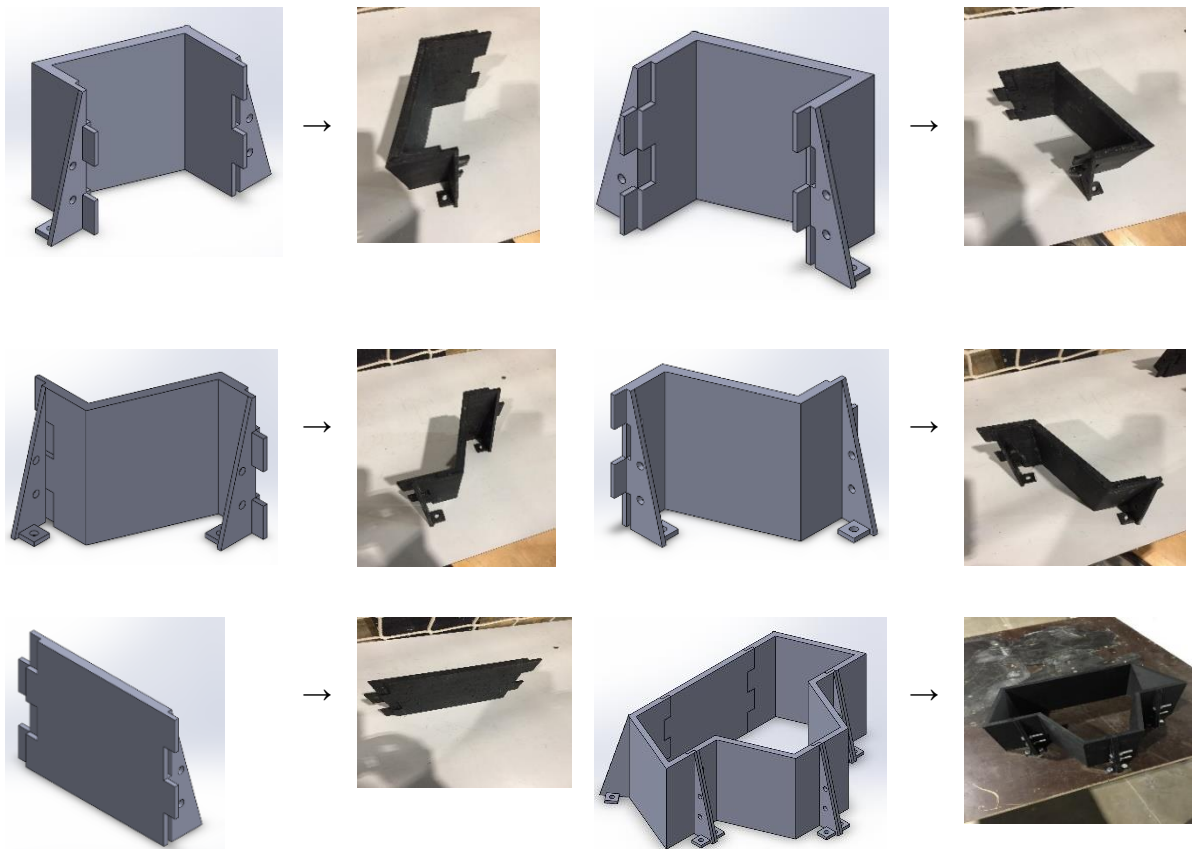
Il semble en fait difficile d'arriver à une précision suffisante de fabrication avec des moules composés de plaques de coffrage en bois; d'où le développement d'un nouveau moule fabriqué par impression 3D.

#### 4.1.1.4. Moule imprimé 3D (moule 4)

La pose et l'assemblage du DEPT par drone peut être validé avec des éléments d'essais à la précision dimensionnelle obtenue avec le moule 3. Cependant, des tests de résistance sur des blocs seuls et sur des assemblages de blocs nécessitent une précision maximale, très difficile à atteindre avec les moules en bois précédemment imaginés.

Un moule imprimable en 3D a alors été dessiné sur SolidWorks. Il a été imprimé en 3D, mais ne permet le coulage des éléments que sur leur tranche (Figures 174); et donc une imprécision de fabrication pour la dimension épaisseur  $e$ . Cependant, les blocs coulés avec ce moule seront utilisés pour les essais de résistance décrits en section 5.4.1.2 et 5.4.2, où il n'est pas important d'avoir une précision dimensionnelle sur l'épaisseur  $e$  des éléments d'essais.

L'imprimante 3D mise à disposition<sup>3</sup> possède des dimensions d'impression maximales de 21,5cm x 21,5cm x 30cm, donc inférieures à celles du DEPT d'essais. Le moule a donc été décomposé en 5 pièces uniques. A noter que les jonctions de pièces n'ont pas été placées au niveau des surfaces de glissement, et ce pour éviter une non-planéité des faces entraînant potentiellement une obstruction lors de la pose. Un jeu de 0.2mm entre les parties « femelles » et « mâles » des connexions entre éléments a été prévu pour assurer leur emboîtement.

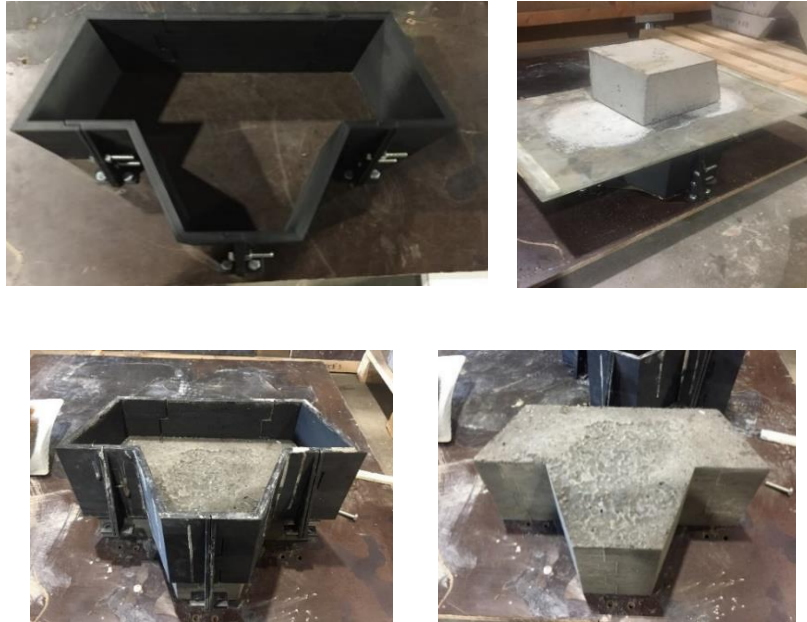


Figures 174 - Pièces du moule modélisées sur SolidWorks et imprimées en 3D

---

<sup>3</sup> Ultimaker 3 Extended

Les pièces du moule sont ensuite fixées ensemble et à la plaque de coffrage par écrous-boulons M8. Lors du coulage d'un DEPT, une plaque en verre est placée sur la face latérale pour obtenir une épaisseur la plus proche de celle désirée et un rendu de surface meilleur qu'avec les moules 1 et 2.



Figures 175 - Etapes de moulage et démoulage d'un DEPT coulé avec le moule 4

Comme on peut le constater sur les Figures 175, le démoulage est très simple: une fois les écrous liant le moule à la plaque de coffrage retirés et ceux liant les éléments du moule entre eux desserrés, le DEPT glisse à travers le moule.

Il est intéressant de mentionner la faible dégradation du moule et de son matériau constituant (PLA<sup>4</sup>) au fil des processus de montage-moulage-démoulage.

Les éléments coulés dans ce quatrième moule feront alors l'objet d'essais de résistance et de stabilité décrits en section 5.4.1.2 et 5.4.2.

#### 4.1.1.5. Récapitulatif

L'importance du bon développement, de la fabrication précise et des processus de montage/démontage minutieux de ces 4 moules ont donné lieu à de longues heures de travail en laboratoire. Il était en effet primordial d'obtenir des blocs bien réalisés pour mener à bien tous les essais effectués par la suite.

Le Tableau 5 récapitule les moules développés, leurs inconvénients et avantages et les degrés de précision dimensionnelle obtenus. Toutes les dimensions des 46 blocs coulés, relevés manuellement, sont repris en Annexe B.1. Le degré de précision d'une dimension  $i$  ( $d_i^\circ$ ) est calculée comme suit :

$$d_i^\circ = \frac{|i_{\text{obtenu}} - i_{\text{théorique}}|}{i_{\text{théorique}}} [\%]$$

Le degré dimensionnelle globale est la moyenne des degrés de précision de chaque dimension (l, e, a, h1, h2,  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$ ). Le tableau présente également plus particulièrement le degré de précision de

<sup>4</sup> Acide polylactique, polymère biodégradable utilisé dans l'impression 3D (9)

l'épaisseur, importante à obtenir au plus proche de la valeur théorique pour limiter les décalages latéraux lors de la pose (section 5.2 et 5.3).

| Moule                                               | Photo                                                                               | Avantages et Inconvénients                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Précision dim. globale | Précision dim. épaisseur |
|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|--------------------------|
| 1<br><br>DC01<br>–<br>DC04                          |    | <ul style="list-style-type: none"> <li>+ simple à couler</li> <li>-- coulage sur la tranche (imprécision e et mauvais rendu de surface latéral)</li> <li>-- fabrication précise complexe</li> <li>-- 1 bloc fabriqués à la fois</li> <li>- fragilité lors de processus montage/démontage répétés</li> <li>- adaptation au GGS difficile</li> </ul> | 98,12%                 | 98,17%                   |
| 2<br><br>DC05<br>–<br>DC12                          |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>+ simple à couler</li> <li>+ 4 blocs fabriqué à la fois</li> <li>-- coulage sur la tranche (imprécision e et mauvais rendu de surface latéral)</li> <li>-- fabrication précise complexe</li> <li>- fragilité lors de processus montage/démontage répétés</li> <li>- adaptation au GGS difficile</li> </ul>  | 98,20%                 | 97,14%                   |
| 3<br><br>DC13<br>–<br>DC30<br>+<br>DC'<br>+<br>DC'' |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>++ 5 blocs fabriqués à la fois</li> <li>++ précision de l'épaisseur</li> <li>+ robuste au processus montage/démontage</li> <li>++ simple à fabriquer/remonter</li> <li>+ adaptation aux GGS simple</li> <li>- fabrication précise complexe</li> <li>- mauvais rendu de surface de la base</li> </ul>        | 98,50%                 | 98,86%                   |
| 4<br><br>DC31<br>–<br>DC37                          |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>++ précision dimensionnelle</li> <li>++ robuste au processus montage/démontage</li> <li>+ processus montage/démontage rapide</li> <li>+ simple à fabriquer/remonter</li> <li>- 1 bloc fabriqué à la fois</li> <li>- coulage sur la tranche (imprécision e et mauvais rendu de surface latéral)</li> </ul>   | 99,50%                 | 99,19%                   |

Tableau 5 - Avantages, inconvénients et précision dimensionnelle atteinte avec les différents moules

On constate sur ce tableau une évolution positive de la précision dimensionnelle. Du moule 1 au moule 4, on passe d'un degré de précision global de 98,12% à 99,50%. Cela représente par exemple pour la dimension longueur l (400mm théorique) des différences dans la dimension obtenue avec le moule 1 de 7,52mm, alors qu'on en obtient 2mm avec le moule 4.

A noter également que le degré de précision de l'épaisseur atteint avec le moule 4 (99,19%) a été obtenu en réduisant la remontée des billes d'Argex dans le béton par limitation de l'utilisation d'une aiguille vibrante et en plaçant une plaque de coffrage en verre après coulage du DEPT d'essai sur la face supérieure du moule (Figure 176).



Figure 176 - Mise en place d'une plaque en verre sur la face supérieure du moule 4

#### 4.1.2. Composition de béton

Nous décrivons ici la composition des bétons utilisée dans le coulage des blocs d'essais. Afin d'obtenir un béton au poids volumique réduit, les graviers et le sable de béton classique ont été remplacés par de l'Argex et de l'Argex concassé. Un entraîneur d'air et un plastifiant sont également ajoutés au mélange.

Le choix du modèle d'essai en section 2.4 reprend la composition de béton étudiée et développée par J.-F. Leboutte et V. Parisel dans leurs travaux en 2017 et le poids volumique correspondant de 1500kg/m<sup>3</sup> (Tableau 6). La description complète des composants sont disponibles dans ce travail (3). Le tableau donne ci-dessous les quantités de composants nécessaires pour couler environ 18L de béton. Ces quantités sont donc à réévaluer pour l'appliquer au DEPT d'essais d'un volume de 9L.

Les premiers blocs d'essais ont été coulés en utilisant la composition alors choisie. Cette composition a été ensuite modifiée lors des coulages successifs afin d'obtenir une composition plus adaptée au DEPT.

| Composant      | Poids (kg) | Volume (L) |
|----------------|------------|------------|
| Ciment 32,5    | 9          |            |
| Argex          | 5          |            |
| Argex concassé | 8          |            |
| Eau            |            | 4          |
| Aérateur       |            | 0,02       |
| Accélérateur   |            | 0,02       |

Tableau 6 - Première composition de béton utilisée

L'Argex est concassé dans une broyeuse à ouverture réglable d'un niveau 1 à 10. Le niveau 10 correspondant au broyage le plus important (Figures 177).



Figures 177 - Broyeuse et niveau de broyage utilisés

Les compositions utilisées dans la fabrication de DEPT d'essais sont constituées uniquement d'Argex concassé par broyage réglé au niveau 5, sans l'ajout d'Argex non-concassé. L'objectif étant d'éviter la présence de billes d'Argex aux dimensions importantes. Sont alors obtenus des blocs au rendu de surface plus lisse, propice à un meilleur glissement entre éléments.

Quant au ciment, le ciment portland CEMII/B-M 32,5N Classic (Holcim) a été utilisé pour tous les éléments fabriqués.

L'eau est ajoutée au mélange d'Argex concassé et de ciment pour obtenir un mélange final possédant une fluidité adaptée. La composition de béton des 3 phases de coulage de DEPT d'essais sont reprises en Annexe B.2. Le Tableau 7 résume les compositions ainsi obtenues et ensuite testées lors d'essais de résistance sur des blocs d'essais de formes cubiques de 15 cm de côté (Annexe B.3).

| Pour 1L de béton                            | <b>Composition 1<br/>(03/04/18)</b> | <b>Composition 2<br/>(09/04/8)</b> | <b>Composition 3<br/>(13/04/18)</b> |
|---------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| Ciment (kg)                                 | 0,487                               | 0,607                              | 0,601                               |
| Argex concassé (kg)                         | 0,702                               | 0,649                              | 0,590                               |
| Pourcentage massique ciment (%)             | 40,94                               | 48,32                              | 50,44                               |
| Pourcentage massique Argex concassé (%)     | 59,06                               | 51,68                              | 49,56                               |
| Eau (L)                                     | 0,401                               | 0,422                              | 0,423                               |
| Poids volumique obtenu (kg/m <sup>3</sup> ) | 1300                                | 1434                               | 1469                                |
| Résistance à la compression (MPa)           | 17,71                               | 19,29                              | 21,31                               |

Tableau 7 - Compositions de béton obtenues et testées en laboratoire

On peut constater qu'une composition contenant plus de ciment contre moins d'Argex nécessite logiquement l'ajout de plus d'eau. La composition 1 en est l'exemple en comparaison des deux autres compositions, plus proches en terme de pourcentage Argex concassé/ciment. Et la composition 1 possède alors un poids volumique plus faible. En parallèle, on constate que plus le pourcentage massique de ciment est important, plus la résistance à la compression sur cube est élevée.

L'optimisation de la composition du béton utilisée afin d'obtenir le béton à la fois le plus léger et le plus résistant ne faisant pas partie des objectifs même de ce travail, nous nous contenterons d'utiliser les compositions ainsi obtenues et testées par essais de compression sur cube (150 x 150 x 150mm).

### 4.1.3. Adaptation aux GGS

Dans un premier temps, et afin de se familiariser avec les processus de mélange de béton, réalisation des moules et coulage des blocs, les premiers DEPT d'essais fabriqués n'ont pas été adaptés à un des trois systèmes de préhension développés décrits en section 3.2.

Par la suite, il était nécessaire d'adapter les moules pour réaliser des blocs permettant la tenue d'essais de préhension avec ces systèmes.

#### 4.1.3.1. GGS-EM

Les premiers essais de préhension et de pose manuel ou avec drone en laboratoire ont été effectués avec le système de préhension par électro-aimants (GGS-EM). La section 3.2.1 dans laquelle ce GGS est décrit mentionne la nécessité d'ancrer dans les DEPT-EM des plaquettes en acier. Celle-ci, en contact avec les électro-aimants qui équipent le GGS, permettront au drone de saisir et déplacer les éléments.

Lors des précédents travaux sur des sujets comparables depuis 2015 (1) (4) (3), une section de tige d'acier de ferrailage de plusieurs centimètres est soudée perpendiculairement à une plaquette d'acier (Figure 178). Le tout est collé avec du collant double-face, la plaquette d'acier face à la paroi du moule correspondante (Figure 179). Le béton est ensuite coulé dans le moule et autour de la tige d'acier pour assurer l'ancrage de la plaquette d'acier dans la face supérieure du DEPT (figure 180).



Figure 178 -  
Plaquettes d'acier



Figure 179 - Fixation des  
plaquettes d'acier au moule



Figure 180 - DEPT équipé de plaquettes  
métalliques

Les deux électro-aimants ayant un diamètre de 5cm, les plaquettes d'acier possèdent des longueur et largeur de 5cm pour assurer un contact complet.

Un essai en laboratoire a été effectué pour déterminer leur épaisseur suffisante à prévoir pour s'assurer que les électro-aimants suffiront à soulever et transporter sans risque le DEPT. En effet, si la plaquette en acier est d'épaisseur trop faible, la force électromagnétique n'est pas suffisante (cas des blocs DC03 et DC04, inutilisables en essai avec GGS-EM).

L'essai réalisé en laboratoire consistait alors à charger une plateforme fixée par tige à un électro-aimant, lui-même en contact avec une plaque d'acier (Figure 181). On mesure ainsi pour chaque épaisseur de

plaque d'acier la force électromagnétique exercée par l'électro-aimant. L'essai complet est décrit et illustré en Annexe B.4. Les résultats sont donnés dans le Tableau 8 et un graphe de l'évolution de la force électromagnétique en fonction de l'épaisseur et de la qualité de surface de la plaque d'acier a été dessiné (Figure 182).



Figure 181 - Dispositif de l'essai de chargement d'un électro-aimant

| Epaisseur (mm) | Coef.Qualité | Epaisseur eq. (mm) | Chargement max (g) |
|----------------|--------------|--------------------|--------------------|
| 1              | 0,9          | 0,9                | 1850               |
| 2              | 1            | 2                  | 4250               |
| 3,5            | 0,6          | 2,1                | 6450               |
| 3              | 0,8          | 2,4                | 8850               |
| 4              | 0,8          | 3,2                | 14050              |
| 10             | 0,4          | 4                  | 38750              |
| 25             | 0,6          | 15                 | 54750              |
| 40             | 0,8          | 32                 | 56550              |

Tableau 8 - Résultats de l'essai de chargement d'un électro-aimant

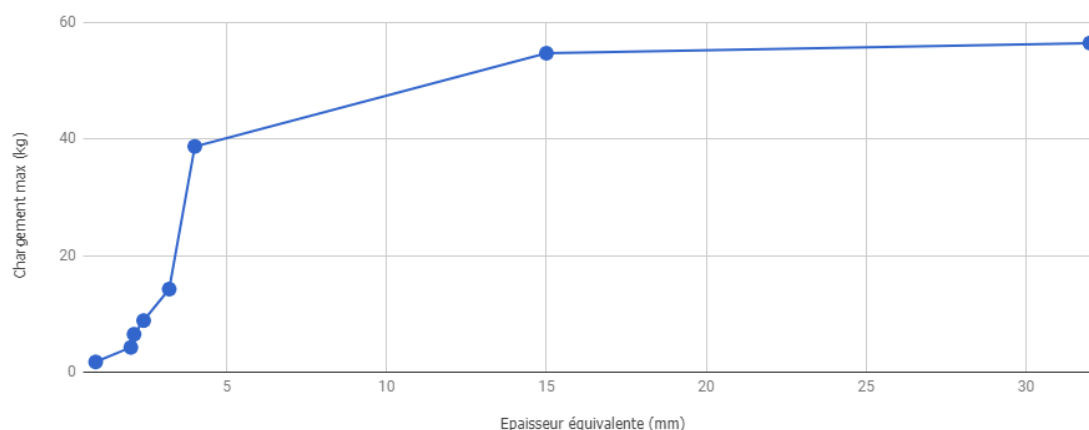


Figure 182 - Graphe des résultats de l'essai de chargement d'un électro-aimant

En considérant des DEPT d'essais de maximum 15kg, que chaque DEPT comporte 2 plaquettes d'acier et que les éléments sont soumis à des accélérations additionnelles lors de virage en vol, des plaquettes d'acier de 4mm d'épaisseur seront placés dans les DEPT-EM fabriqués.

#### 4.1.3.2. GGS-G

C'est un avantage du GGS-G (section 3.2.5): il ne nécessite pas de modification du DEPT, c'est-à-dire qu'un DEPT coulé sans adaptation de son moule ou sans l'ajout d'autres éléments constitutifs peut être transporté par drone équipé du GGS-G.

#### 4.1.3.3. GGS-T

Le système de préhension par rotation d'une tige de forme T (GGS-T) est expliqué en section 3.2.3. Ce système nécessite la mise en place d'une fente en forme de T inversé dans le profil du DEPT-T (Figures 183, 184, 185 et 186).

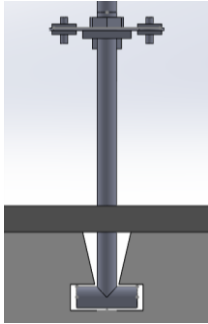


Figure 183 - Tige T en position fermée

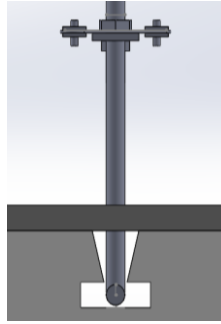


Figure 184 - Tige T en position ouverte

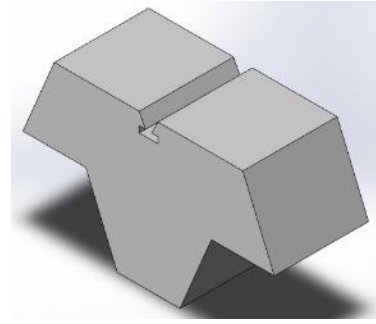


Figure 185 - DEPT équipé d'une fente en T

Pour obtenir un moule permettant la fabrication de DEPT-T, il est nécessaire d'y ajouter une nouvelle pièce reprenant la forme de la fente prévue. Cet élément additionnel se compose de deux pièces réalisées en impression 3D. Celles-ci sont ensuite assemblées en introduisant un élément en bois à l'épaisseur légèrement supérieure dans l'encoche des pièces en impression 3D où il se loge. Le tout est alors vissé dans le moule sur la face supérieure du bloc, donc la paroi inférieure du moule 3, après quoi le béton est coulé dans le moule et autour de l'élément additionnel (Figures 187).

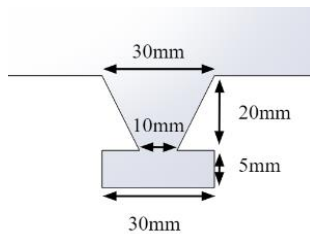


Figure 186 - Dimensions de la fente du DEPT d'essais



Figures 187 - Intégration de la pièce additionnelle du moule adapté au GGS-T

Cet élément est composé de ces 3 pièces pour pouvoir le sortir du bloc, en poussant hors du bloc la pièce en bois. Ensuite, les pièces imprimées en 3D peuvent être facilement enlevées. Les DEPT-T fabriqués possèdent alors la fente attendue aux dimensions propres, garanties par ces pièces et possédant des dimensions très précises (Figures 188 et 189).



Figures 188 - Etapes de démoulage de l'élément additionnel



Figure 189 - DEPT adapté au GGS-T

#### 4.1.3.4. Inclusions latérales d'insertion du guide

Dans la section 3.3.4, l'idée d'ajouter des fentes ou inclusions d'insertion du guide dans les faces latérales est proposée. Le but étant de limiter au maximum le décalage latéral de pose des DEPT.

Pour ce faire, des plaquettes en acier d'1,5mm d'épaisseur, découpée selon le profil du bloc à couler, sont collées avec du collant double-face sur les parois intérieures du moule. Le béton est ensuite coulé dans le moule et autour des plaquettes d'acier. Une fois le bloc sec et démoulé, il suffit d'enlever les plaquettes d'acier pour obtenir un DEPT équipés d'inclusions latérales d'insertion du guide (Figures 190)



Figures 190 - Fabrication du moule pour DEPT à inclusions latérales

#### 4.1.4. Blocs fabriqués

##### 4.1.4.1. Récapitulatif

Cette section contient la description de tous les DEPT fabriqués entre le 3 novembre 2017 et le 28 mai 2018. La liste complète est disponible en Annexe B.5 dans un tableau reprenant, pour chaque DEPT:

- la date du coulage du béton;
- le type de DEPT coulé;
- le moule utilisé;
- l'adaptation à un ou plusieurs GGS;
- la présence d'inclusions latérales d'insertion de guide;
- la composition de béton utilisée;
- la possibilité d'utiliser le bloc pour des essais de pose.



Figure 191 - DEPT d'essais fabriqués par moule 1, 2 et 3

Fabriquer ces 46 blocs a représenté une quantité de travail considérable, au vu du temps nécessaire à la fabrication précise des moules, à l'ajout d'adaptations pour les GGS, au mélange et au coulage du béton, au démoulage des blocs et au remontage soigné des moules. Et il est important d'en informer tout lecteur voulant s'inspirer de ce travail pour fabriquer de tels éléments.

#### 4.1.4.2. Défauts de réalisation constatés

Lors du démoulage de certains DEPT, de la vérification des dimensions obtenues ou des premiers essais manuels, des défauts de réalisation sont apparus. Les conséquences sur l'utilisation de blocs defectueux lors des essais décrits par après sont nombreuses et parfois lourdes. Certains blocs seront d'ailleurs tout simplement déclarés inutilisables en essai.

Le Tableau 9 reprend les défauts notables apparus et leur(s) conséquence(s) pour les 46 DEPT fabriqués.

| DEPT              | Photo                                                                               | Défaut et conséquence                                                                                        | Origine et solution                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| DC01              |  | Non-planéité de la surface de glissement<br>→ mauvais glissement du bloc à poser sur les blocs déjà en place | Alignement des plaques de coffrage<br>→ nouvelle disposition des plaques de coffrage dans le moule 2                                                                                                                                                                                                            |
| DC01<br>-<br>DC08 |  | Mauvais rendu de surface d'une face latérale<br>→ imprécision dimensionnelle de l'épaisseur e                | Bloc coulé sur la tranche, remontée de billes d'Argex sur la face non-moulée<br>→ blocs coulés sur la face supérieure dans le moule 3<br><br>→ réduction de la remontée des billes d'Argex par limitation de l'utilisation d'une aiguille vibrante et mise en place d'une plaque de coffrage en verre (moule 4) |

|                   |                                                                                     |                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                               |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| DC07              |    | <p>Voilement d'une face de glissement et présence d'un angle avec la face supérieure</p> <p>→ assemblage correct des blocs supérieurs impossible et déformation du mur obtenu</p>     | <p>Déplacement d'une plaque de coffrage lors du coulage du béton</p> <p>→ moule 3 plus robuste et rigide avec moins de risque de déplacement de plaques de coffrage</p>                                                                       |
| DC05<br>-<br>DC07 |    | <p>Décollement des plaquettes d'acier (préhension par GGS-EM) du moule et plaquettes recouvertes de béton</p> <p>→ utilisation par GGS-EM impossible</p>                              | <p>Plaquettes d'acier à coller sur une paroi verticale du moule, difficulté de la maintenir collée</p> <p>→ plaquettes d'acier collées sur la paroi horizontale inférieure du moule 3</p>                                                     |
| DC13<br>-<br>DC30 |   | <p>Mauvais rendu de surface de la base</p> <p>→ imprécision dimensionnelle de la hauteur h</p>                                                                                        | <p>Bloc coulé sur la face supérieure, remontée de billes d'Argex sur la face non-moulée</p> <p>→ limitation de la remontée des billes d'Argex et diminution de la hauteur de béton coulé</p>                                                  |
| DC11              |  | <p>Fissuration du bloc lors du démoulage et casse du bloc</p> <p>→ plusieurs faces non-obtenues et bloc inutilisable en essais</p>                                                    | <p>Fragilité du béton utilisé et/ou démoulage nécessitant l'utilisation de marteau</p> <p>→ revoir la composition de béton</p> <p>→ moule avec démoulage sans besoin de marteau</p>                                                           |
| DC28-<br>DC30     |  | <p>Mauvais rendu de surface des faces placées vers le haut lors du moule de bloc avec le moule 3</p> <p>→ glissement entre les faces de glissement plus difficile lors de la pose</p> | <p>Plaque de coffrage sur le haut de la face à l'horizontale - retrait du béton avec le séchage mais adhérence avec la plaque de coffrage</p> <p>→ revoir la composition de béton (augmenter la quantité de ciment ou utiliser adjuvants)</p> |

|                                          |                                                                                   |                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                              |
|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| DC09,<br>DC14,<br>DC19,<br>DC22,<br>DC28 |  | Casse dans les coins<br>→ blocage possible lors de la pose (>< glissement)<br>→ mauvais rendu visuel du mur posé | Arêtes fines et chocs lors du transport/de la manipulation<br>→ éviter les arêtes minces<br>→ revoir la composition de béton pour un béton moins fragile                                                     |
| DC27                                     |  | Rupture du béton adjacent à la fente (préhension par GGS-T)<br>→ préhension par GGS-T impossible                 | Apparition de fissures lors du retrait de l'élément additionnel du moule pour le moulage de bloc DEPT<br>→ retrait plus minutieux de l'élément additionnel (masse en caoutchouc plutôt que marteau en acier) |

Tableau 9 - Défauts de fabrication de DEPT

Le relevé de ces défauts a mené à l'exclusion de 6 blocs de tout essai d'assemblage et 4 blocs de tout essai d'assemblage par GGS-EM (mais toujours utilisable pour des essais par GGS-G).

#### 4.1.5. Conclusion

La réalisation des différents moules présentés a pris une part importante dans ce travail. La précision nécessaire à la bonne réalisation d'essais grandeur nature en laboratoire a nécessité une conception et un assemblage minutieux, malgré la simplicité de la forme du DEPT.

L'utilisation de moules composés de plaques de coffrage, poncées et vissées pour leur assemblage, à montrer ses faiblesses. Le bois se dégrade très vite à chaque processus de montage du moule/coulage du béton/démontage du moule/démoulage des blocs. En plus de gonfler en absorbant une partie de l'humidité du béton, la mise en place de vis dans le profil des plaques de coffrage en contreplaqué a déformé et dégradé au fur et à mesure les moules. Il est alors de plus en plus difficile d'arriver à une précision dimensionnelle des blocs fabriqués suffisante, jusqu'à arriver à des moules inutilisables.

Cependant, l'évolution du type de moule utilisé a permis de gagner à la fois en précision dimensionnelle, suffisante pour la tenue de premiers essais manuels ou avec drone; mais aussi à diminuer la fragilité du moule et le temps nécessaire aux différents cycles complets de fabrication de blocs d'essais.

## 4.2. Fabrication de systèmes de préhension et de guidage

L'autre étape de préparation des essais de validation du DEPT et de son GGS associé est la fabrication des différents GGS. Cela a été fait en parallèle à la fabrication des blocs, et sur base des éléments développés dans le chapitre 3.

La fabrication de trois systèmes de préhension et de guidage dits GGS seront ici présentés et illustrés: le GGS-EM (par électro-aimants), le GGS-T (par rotation de tige de forme T) et le GGS-G (par pince de levage). Chaque système est constitué de plusieurs pièces fabriquées et assemblées en laboratoire. A l'utilisation de matériau (bois, acier, aluminium, caoutchouc) et de matériel de base (écrous/boulons,

tiges filetées, vis) s'ajoutent la fabrication de pièces imprimées en 3D et l'utilisation de moteurs-cerveaux (ou servomoteurs) activant l'ouverture et la fermeture des GGS.

Tout ce travail de réflexion, fabrication et assemblage visent à obtenir des GGS fonctionnels, ergonomiques et respectant le cahier des charges présenté dans la section 3.1.

Pour éviter toute confusion dans la section qui suit, il est important de rappeler le différent rôle des composants essentiels des GGS :

- système de préhension : système permettant de saisir, transporter et déposer le DEPT ;
- système de reprise de l'imprécision latérale de pose ou système de guidage latéral de pose : système qui va corriger, lorsque le DEPT est posé à son emplacement, l'imprécision dans le sens perpendiculaire au mur ;
- système de reprise de l'imprécision longitudinale de préhension ou système de guidage longitudinal de préhension : système qui place le GGS et le drone dans le bon alignement longitudinal avec le DEPT lors de sa préhension ;
- système de reprise de l'imprécision latérale de préhension ou système de guidage latéral de préhension : système qui place le GGS et le drone dans le bon alignement latéral avec le DEPT lors de sa préhension ;
- système de reprise de l'imprécision latérale : lorsque le système est le même lors de la préhension et de la pose (GGS-EM et GGS-T).

## 4.2.1. Servomoteurs

### 4.2.1.1. Composants et fonctionnement

La mise au point de certains de ces GGS (ici le GGS-T et le GGS-G) va nécessiter l'utilisation de ce qu'on appelle des "servomoteurs". Ces servomoteurs sont beaucoup utilisés en modélisme pour assurer la rotation de parties mobiles, comme des ailerons ou des trains d'atterrissage d'avions miniatures, et seront ici utilisés pour ouvrir ou fermer le système de préhension utilisé. Cette section décrira brièvement le fonctionnement de ces "servos" et permettra de mieux comprendre leur utilisation dans la fabrication et l'utilisation des GGS.

Les servomoteurs intègrent un moteur, un système d'engrenages, un circuit de contrôle, un potentiomètre et finalement un axe de sortie. Ce sont de petits moteurs légers commandés par une sortie à 3 câbles (Figures 192). Selon le signal qu'ils reçoivent, ils adoptent un positionnement angulaire entre  $-90^\circ$  et  $90^\circ$  de leur position initiale (ou parfois entre  $-45^\circ$  et  $45^\circ$ ).



*Figures 192 – Servomoteur utilisés dans les GGS et ses composants*

Le moteur reçoit sa consigne de positionnement sous la forme d'un signal "codé en largeur d'impulsion", c'est-à-dire que c'est la largeur de l'impulsion du signal reçu qui définira l'angle de l'axe de sortie.

En fait, le signal envoyé au servo est un signal de période valant généralement 20 millisecondes, contenant une impulsion de largeur pouvant varier. Dans l'exemple qui suit et qui est le cas le plus fréquent (Figure 193), lorsque la largeur de l'impulsion vaut 1 milliseconde, l'axe de sortie adoptera un angle de  $-90^\circ$ . Si le signal change et possède une largeur d'impulsion de 1,5 millisecondes, l'axe tournera pour se mettre en position  $0^\circ$ . Une largeur d'impulsion de 2 millisecondes correspond à une position de l'axe à  $+90^\circ$ .

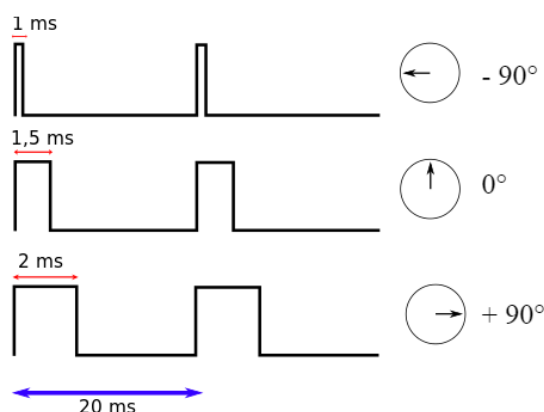


Figure 193 - Réponse du servomoteur en fonction du signal reçu

L'exemple présenté ici n'est qu'un parmi d'autres: certains servomoteurs reçoivent un signal à périodicité différente, tandis que l'angle de l'axe adopté dépend du servomoteur lui-même et de son calibrage.

Le signal est en fait lu par le circuit de contrôle qui va donner l'instruction au moteur, transmis alors au système d'engrenages.

#### 4.2.1.2. Utilisation par drone

Ces moteurs peuvent directement être raccordés au drone via sa sortie à 3 fiches. Ensuite, depuis la radiocommande du drone, une instruction peut être donnée à l'un des servomoteurs connectés. Le drone enverra alors le signal avec la largeur d'impulsion souhaitée au servomoteur, qui a son tour adoptera le positionnement demandé.

L'utilisation précise de ces servomoteurs à partir de la radiocommande nécessitera un calibrage. Une fois le servomoteur raccordé au drone, l'utilisateur va, depuis la radiocommande, fixer une valeur milieu de la rotation du servomoteur. Cette position de rotation sera alors celle prise par le servo lorsqu'il recevra un signal avec une impulsion de 1,5ms (si on considère l'exemple en Figure 193).

Ensuite, l'utilisateur pourra augmenter ou diminuer l'amplitude de la rotation lorsqu'il passera d'une position neutre ( $0^\circ$ , signal à largeur d'impulsion de 1,5ms) à une position on ou off. Ainsi, si on considère l'exemple ci-dessus et que l'on désire une position à  $90^\circ$  en position on et une position à  $-90^\circ$  en position off, l'amplitude sera de 100%. Si par contre, on souhaite une position à  $45^\circ$  en position on et  $-45^\circ$  en off, l'amplitude doit être diminuée à 50%.

Ce calibrage sera nécessaire lors de l'utilisation de servomoteurs dans les GGS-T et GGS-G.

#### 4.2.2. GGS-EM

Pour rappel, le GGS-EM se compose de 5 éléments: les électro-aimants (a), les éléments de guidage longitudinal (b), les rails de guidage latéraux (c), un élément faisant le lien entre toutes ces parties (d) et finalement la tige reliant le tout au drone (e) (Figure 194).

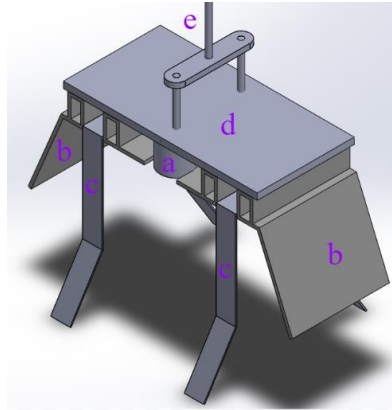
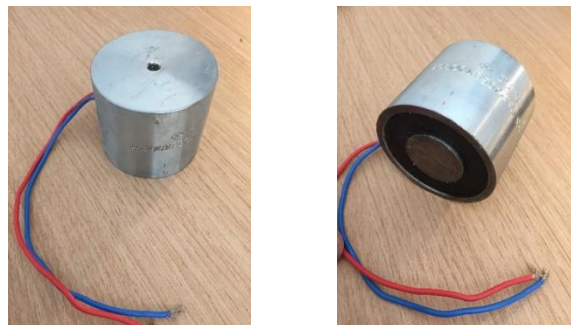


Figure 194 - Eléments composants du GGS-EM

#### Système de préhension à électro-aimants

Les électro-aimants utilisés possèdent un diamètre de 5 cm et une hauteur de 4,5 cm. Ils sont connectés au reste du dispositif par une tige filetée visée en leur centre (Figures 195). La fiche composée de deux câbles est connectée au drone et permet d'activer ou désactiver l'électro-aimant.



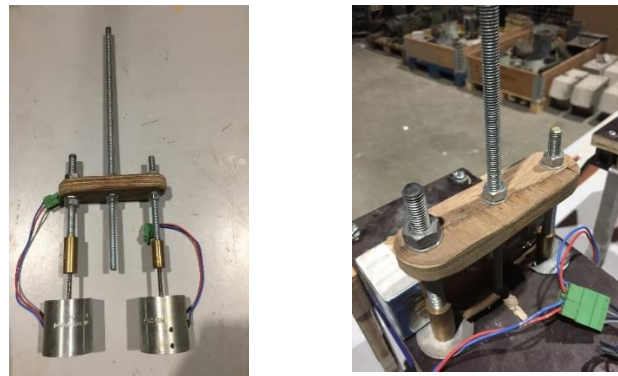
Figures 195 - Electro-aimants utilisés pour le GGS-EM

En s'inspirant de l'application du système de préhension par électro-aimants dans les différents travaux ultérieurs dans le domaine des éléments de maçonnerie drone-compatibles, 2 électro-aimants sont utilisés. Les plaquettes métalliques sont placées sur la face supérieure du DEPT, au centre longitudinalement et sur les côtés latéralement (Figure 196). Il faudra donc veiller à placer dans le GGS-EM les électro-aimants à la même distance l'un de l'autre que les plaquettes métalliques dans le DEPT.



Figure 196 - Placement des plaquettes métalliques dans le DEPT

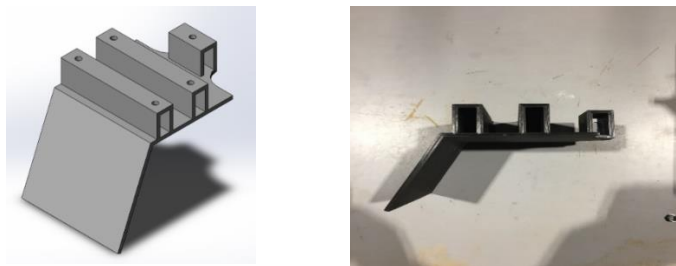
Les deux électro-aimants sont reliés par une tige filetée à un élément “relai” en bois, lui-même est relié au drone par une autre tige filetée (Figures 197). Les électro-aimants sont donc reliés au drone par l’intermédiaire de cet élément en bois.



*Figures 197 - Assemblage et connexion des électro-aimants*

### **Éléments de guidage longitudinal**

Pour guider longitudinalement le drone et le GGS lors de la préhension du DEPT, des éléments ont été dessinés sur SolidWorks puis imprimés en 3D. Ces pièces possèdent une face inclinée de guidage, une face de support (qui sera au contact de la face supérieure du DEPT), des ouvertures pour les électro-aimants et une élévation permettant leur fixation au reste du dispositif (Figures 198).



*Figures 198 – Éléments de guidage longitudinal du GGS-EM modélisés sur SolidWorks et imprimés en 3D*

### **Rails de guidage latéral**

4 rails sont ajoutés au GGS: 2 sur chaque face latérale du DEPT. Pour cela, 2 plaques d’acier de 3 cm de largeur et de 1,5 mm d’épaisseur ont été découpées et pliées manuellement créer des rails inclinés corrigeant les 5 cm d’imprécision de chaque côté. Le matériau choisi permet d’obtenir des surfaces suffisamment lisses (Figure 199).



*Figure 199 - Pliage des rails de guidage latéral*

Ces rails sont ensuite introduits dans les rainures prévues à cet effet dans les éléments de guidage longitudinal fabriqués par impression 3D.

## Assemblage

Tous les éléments sont assemblés à une planche en bois de dimension égale à celle de la face supérieure du DEPT. Les éléments imprimés en 3D y sont boulonnés tout en maintenant les rails de guidage latéraux dans les fentes. Les électro-aimants sont ensuite placés sous la planche d'assemblage, dans les ouvertures prévues dans les éléments en 3D. Les tiges filetées qui les relient à l'élément relais en bois traversent la planche. Le tout est alors connecté au drone par la tige filetée fixée à l'élément relais en bois (Figure 200).

Après les premiers essais (voir section 5.2.1), les rails de guidage en acier de 1,5mm d'épaisseur se sont montrés trop déformables lors de la pose de DEPT. Les rails s'écartent et ne remplissent pas efficacement leur rôle de reprise d'imprécision latérale de pose. Il a donc fallu ajouter des éléments en bois pour rigidifier les rails de guidage (Figure 201).



Figure 200 - Ajout des rails de guidage latéral



Figure 201 - Ajout de raidisseurs en bois

## Essais manuels et essais par drone

Pour procéder à des essais avec drone du GGS-EM, les fiches des électro-aimants doivent être connectées au drone et à la batterie fixée sur celui-ci. Le pilote peut ensuite, via la radiocommande du drone, donner comme instruction au drone d'alimenter ou pas les électro-aimants.

Le GGS-EM d'essai pèse 3,813kg.

Les essais manuels nécessitent l'ajout au GGS-EM d'une batterie et d'un interrupteur. La batterie est simplement connectée aux électro-aimants par l'intermédiaire de l'interrupteur. Cela permet de passer en position fermée (électro-aimants actifs et préhension du DEPT) ou en position ouverte (électro-aimants inactifs et dépôt du DEPT) en exerçant une pression sur l'interrupteur. La masse de ce GGS-EM est alors de 3,973kg.



Figure 202 - GGS-EM d'essais

### 4.2.3. GGS-G

La fabrication du GGS-G s'inspire et a utilisé des pièces de la pince de levage en aluminium développée par A. Naveau et A. Moncourrier dans leurs travaux en 2015 (4). La photo suivante présente la pince alors réalisée (Figure 203). L'assemblage des autres éléments du GGS-G sera différent de celui des GGS-EM.



*Figure 203 - Pince de levage fabriquée par A. Naveau et A. Moncourrier*

#### **Système de préhension par pince de levage**

Les pièces en aluminium de la pince de levage de A. Naveau et A. Moncourrier ont été récupérées. La largeur de la pince a été agrandie pour deux raisons. D'abord pour assurer une préhension plus sûre des DEPT d'essais en augmentant la surface de contact entre la pince et les parois du bloc. Ensuite pour faciliter le couplage avec le système de guidage latéral (voir ci-après). Des tiges filetées ont été utilisées pour réassembler les éléments d'aluminium et remplacer les boulons de la pince d'origine. Le GGS-G peut saisir le DEPT sur 24 cm, correspondant à une surface de contact totale entre GGS-G et DEPT de 216 cm<sup>2</sup> (Figure 204).



*Figure 204 - Eléments en bois assurant le contact avec le DEPT*



*Figure 205 - Eléments en bois d'épaisseur 2,5cm*

La géométrie et les dimensions des pièces d'aluminium récupérées permettent à la pince de saisir des éléments de 20 cm d'épaisseur. L'idée est alors de modifier le système pour diminuer son empattement en préhension à l'épaisseur des DEPT d'essais, c'est-à-dire 15 cm. Les pièces établissant le contact avec le DEPT, fixés au bout de la pince, ont été fabriquées en bois. En leur donnant une épaisseur de 2,5cm chacune, on réduit alors l'empattement de préhension de la pince à 15 cm (Figure 205).

La préhension du DEPT se fait par resserrage de la pince par effet de la gravité lorsque le drone décolle. Il faut alors prévoir un dispositif bloquant ce resserrage lorsque le DEPT est posé et que le drone doit redécoller. Ce dispositif a également été repris des travaux de A. Naveau et A. Moncourrier (4). Un

servomoteur fixé sur la tige filetée constituant l'axe supérieur de la pince va placer un crochet fabriqué en aluminium sous la tige filetée constituant l'axe central (Figures 206). La fermeture de la pince est alors empêchée et le soulèvement du GGS-G peut s'effectuer sans saisir ni déplacer le DEPT posé.



*Figures 206 - Rotation du crochet de fermeture du système*



*Figure 207 - Blocage de la fermeture du GGS-G en vol*

### **Éléments de guidage longitudinal**

Ces éléments ont également été fabriqués par impression 3D. Les deux pièces imaginées, identiques, se fixent à la tige filetée constituant l'axe central de la pince de levage. Elles sont fixées ensemble au centre du GGS-G (Figures 208).



*Figures 208 - Éléments de guidage longitudinal du GGS-G modélisés sur SolidWorks et imprimés en 3D*

### **Rails de guidage latéraux**

Le système de préhension par pince de levage s'appuie sur les faces latérales du DEPT pour le saisir. C'est pourquoi la pince va servir de support aux rails de guidage latéral. Des plaquettes en aluminium ont été découpées et pliées pour obtenir des faces inclinées qui guideront le DEPT vers son

positionnement latéral précis. Ces plaquettes sont ensuite fixées à l'aide de vis aux éléments en bois de la pince (Figures 209).



*Figures 209 - Rails de guidage latéral de pose du GGS-G*

D'autres éléments doivent être prévus pour reprendre l'imprécision du drone lors de la préhension du DEPT, puisque les rails de guidage fixés à la pince ne peuvent l'assurer lorsque la pince est en position ouverte (section 3.4.2). Un profil en bois est découpé avec les faces inclinées nécessaires et est ajouté par boulons aux éléments de guidage longitudinal sur l'axe central de la pince. Une fine plaque en acier est finalement introduite sous le guide en bois pour assurer le glissement du système sur le DEPT (Figures 210).



*Figures 210 - Rails de guidage latéral en préhension du GGS-G*

## Assemblage

L'axe central de la pince constitue dans le GGS-G l'élément de liaison entre les différentes parties: pince de levage, éléments de guidage longitudinal et éléments de guidage latéral en préhension. Le GGS-G est fixé au drone par une tige filetée reliée à la tête de la pince (Figure 211).



*Figure 211 - Lien entre pince de levage et tige filetée d'attache au drone*

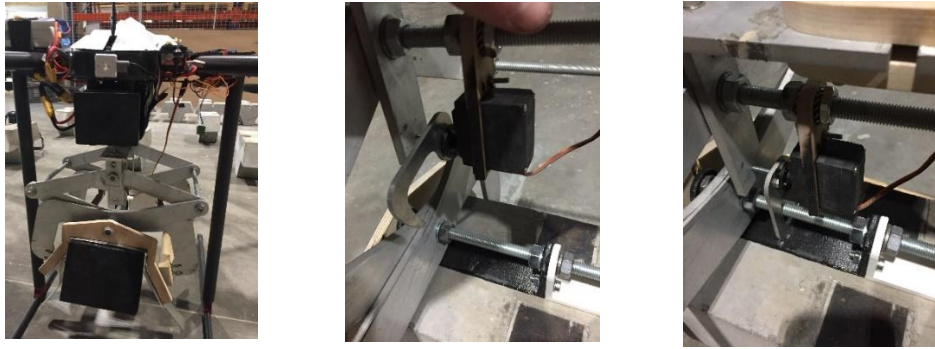


*Figure 212 - GGS-G d'essais*

## Essais manuels et essais par drone

Des essais à la main du GGS-G sont simples à réaliser (section 5.2.2). Il suffit de soulever le GGS-G une fois placé sur un DEPT pour le saisir. Lors du placement du bloc, la pince va s'ouvrir et il suffit de bloquer son resserrage manuellement.

Pour les essais avec un drone (section 5.3.2), le servomoteur doit y être relié. Par instruction du pilote sur sa radiocommande, le drone enverra le signal correspondant à la position fermée ou ouverte du servomoteur et donc du système, bloquant ou pas le resserrage de la pince (Figures 213).



Figures 213 - Connexion du servomoteur de fermeture du système au drone

Le GGS-G d'essais pèse 4,473kg, soit 0,660kg de plus que le GGS-EM et 2,188kg de plus de le GGS-T. Il se caractérise, comme prévu, par un encombrement important. En position de préhension, sa hauteur est de 48,5cm alors qu'en position ouverte, il mesure 38,5cm de largeur.

### 4.2.4. GGS-T

La fabrication du GGS-T est très similaire à celle du GGS-EM, le système de préhension étant monté dans la partie supérieure du dispositif. La Figure 214 présente le GGS-T tel qu'imaginé et dessiné sur SolidWorks. On y retrouve:

- le système de préhension par rotation de tige à forme T (a);
- les rails de guidage latéraux (b);
- les éléments de guidage longitudinal (c);
- la planche d'assemblage, comme développé pour le GGS-EM (d);
- la tige filetée d'attache au drone (e)

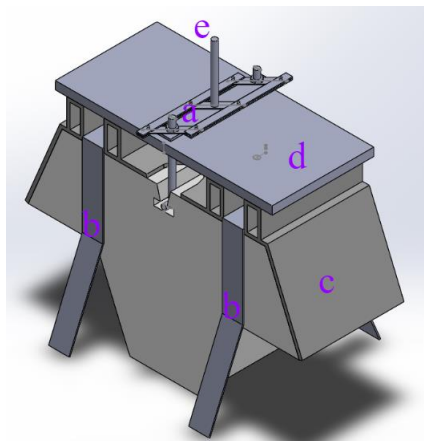


Figure 214 - Eléments composants du GGS-T

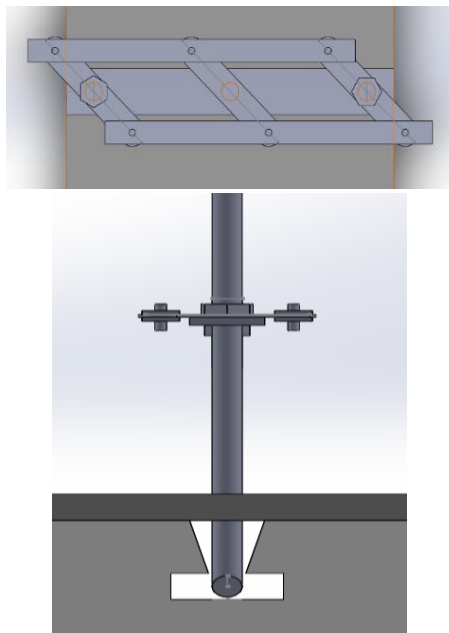
### Système de préhension à rotation de tige à forme T

Le système se compose premièrement de deux tiges filetées M8 au bout desquelles ont été soudées des pièces d'accroche en acier de 2,5cm de longueur. Ces pièces d'acier ont été minutieusement poncées pour obtenir des congés sur toutes leurs arêtes (Figures 215). On s'assure ainsi d'éviter lors de la pénétration et lors du retrait le blocage des tiges T dans la rainure du DEPT prévue à cet effet.

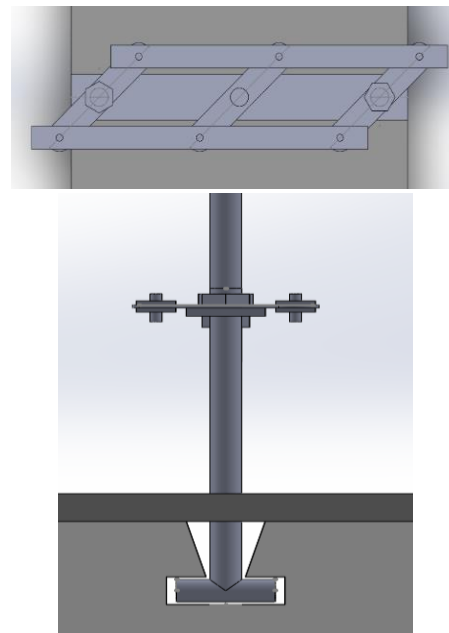


*Figures 215 - Pièces d'acier de la tige T*

Ensuite, les tiges filetées sont soudées à de fines plaquettes en acier. Elles transmettront aux tiges et donc aux éléments d'accroche en acier la rotation nécessaire à la mise en position ouverte ou fermée du GGS-T. 4 autres éléments en acier (2 par côté, 1 en bas et 1 en haut) constituent la connexion du dispositif, permettant aux 3 plaquettes en acier de tourner simultanément et avec le même angle de rotation. Les éléments d'accroche pointent alors toujours dans la même direction. Lorsque les plaquettes sont à  $-45^\circ$  par rapport à l'axe du DEPT, le système est en position ouverte et les tiges peuvent entrer dans la rainure du DEPT (Figures 216). Après rotation de  $90^\circ$ , les plaquettes sont à  $45^\circ$  par rapport à l'axe du DEPT et le système est en position fermée: le drone peut s'envoler avec le DEPT (Figures 217).



*Figure 216 - Système en position ouverte*



*Figure 217 - Système en position fermée*

Toutes les plaquettes en acier utilisées ont été découpées avec la précision atteignable avec le matériel disponible en LEMSC (disqueuse portative, ponceuse à ruban), puis assemblées avec des boulons et écrous M5. Le dispositif obtenu est présenté en Figure 218.



*Figure 218 - Dispositif de mise en rotation des tiges T*

Pour faire tourner le dispositif de  $90^\circ$  pour passer d'une position à l'autre, un servomoteur est utilisé (voir 4.2.1). Celui-ci est fixé sur une plateforme en bois connectée au GGS-T par boulonnement à la tige filetée d'attache au drone (Figure 219).



*Figure 219 - Plateforme du servomoteur du système GGS-T*

Au début de la réflexion, l'idée était de transmettre la rotation du servomoteur à la plaquette centrale, ensuite transmise aux tiges en forme T via les autres plaquettes d'acier composant le dispositif. Cependant, il est apparu plus simple en laboratoire de transmettre la rotation du servomoteur au dispositif par des fils fins. Des boulons M5 ont pour cela été ajoutés et les fils y sont fixés via une rondelle M8 (Figures 220).



*Figures 220 - Transmission de la rotation par fils*

Ainsi, la rotation vers la gauche (vue de face du servomoteur) du servomoteur va tirer le système vers sa position à  $-45^\circ$ , sa position ouverte. Ensuite, la rotation vers la droite d'environ  $90^\circ$  tire le dispositif vers sa position à  $45^\circ$ , fermée (Figures 221 et 222).

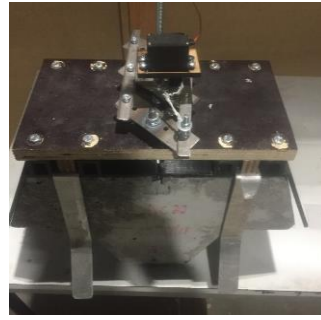
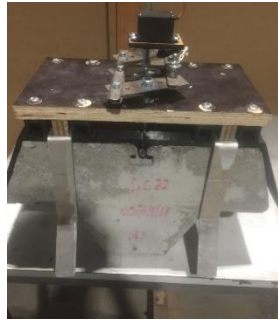
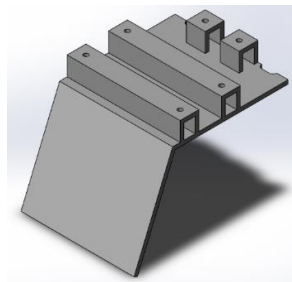


Figure 221 - Système en position ouverte

Figure 222 - Système en position fermée

### Eléments de guidage longitudinal

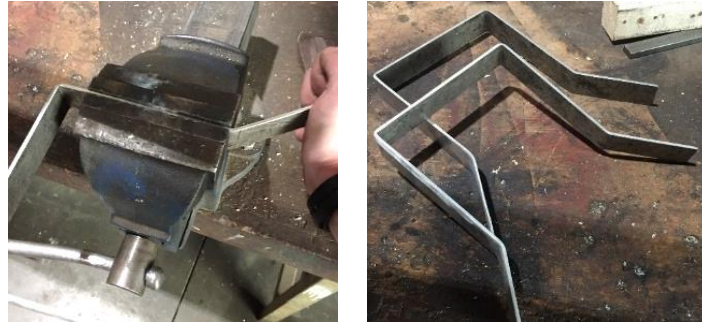
Ces éléments sont les mêmes que ceux imaginés et fabriqués pour le GGS-EM, à quelques exceptions près (Figures 223). Sa hauteur est plus faible puisqu'il n'y a plus d'électro-aimants de 4,5cm à placer en dessous de la planche d'assemblage. Les ouvertures pour les électro-aimants de 5cm de diamètre ont été remplacées par des ouvertures ovales permettant de faire passer les éléments d'accroche du système de préhension.



Figures 223 - Eléments de guidage longitudinal de GGS-T modélisés sur SolidWorks et imprimés en 3D

### Rails de guidage latéral

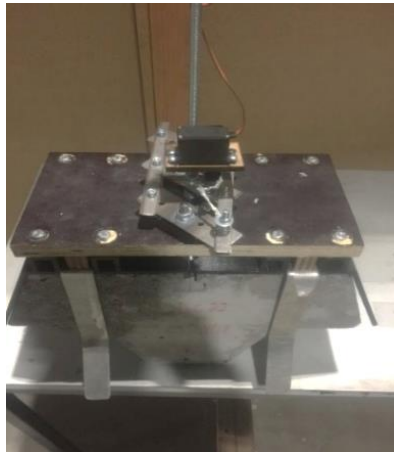
Les rails de guidage latéral ont été fabriqués de la même façon que ceux du GGS-EM. Cependant, les premiers essais effectués avec le GGS-EM ont montré que ceux-ci n'avaient pas la rigidité suffisante pour éviter une déformation trop élevée lors de la pose du DEPT. Pour le GGS-T, de l'aluminium de 3 millimètres d'épaisseur a été utilisé. Les rails de guidage sont maintenant à la fois plus rigides mais aussi plus légers (Figures 224).



*Figures 224 - Fabrication des rails de guidage latéral en aluminium*

### Assemblage

Ici aussi, une planche d'assemblage en bois fait office de lien entre toutes les pièces. Les guides sont glissés dans les éléments de guidage longitudinal imprimés en 3D. Tout est ensuite fixé à la planche d'assemblage. Puis il suffit d'ajouter par boulonnement le système de préhension (Figure 225).



*Figure 225 - GGS-T d'essais*

### Essais manuels et essais par drone

Les premiers essais effectués avec le GGS-T ont été faits en enclenchant et déclenchant le système de préhension manuellement (section 5.2.1). Il suffit pour cela de tirer sur les fils reliés au servomoteur pour induire la rotation de  $+45^\circ$  ou  $-45^\circ$ .

Ensuite, lors d'essais avec le drone (section 5.3.3), le servomoteur est relié au drone. Par instruction du pilote sur sa radiocommande, le drone va envoyer au servomoteur le signal correspondant à une position à  $-45^\circ$  (position ouverte) ou celui correspondant à la position  $45^\circ$  (fermée) du dispositif.

Le GGS-T fabriqué est plus léger que le GGS-EM: il pèse 2,285kg. Cette différence provient du poids des électro-aimants et des raidisseurs latéraux en bois qui équipent ce dernier.

#### 4.2.5. Conclusion

La fabrication de ces 3 systèmes de préhension et de guidage a fait intervenir plusieurs techniques et matériaux. Les GGS obtenus sont fonctionnels, simples de fonctionnement sans être trop encombrants ni trop lourds. Le Tableau 10 reprend dimensions et poids de chaque système.

|          | <b>GGS-EM</b> | <b>GGS-T</b> | <b>GGS-G</b>      |
|----------|---------------|--------------|-------------------|
| Masse    | 3,813kg       | 2,285kg      | 4,473kg           |
| Longueur | 408mm         | 408mm        | 408mm             |
| Largeur  | 206mm         | 208mm        | 385mm<br>(ouvert) |
| Hauteur  | 345mm         | 315mm        | 485mm<br>(fermé)  |

*Tableau 10 - Masse et dimensions des différents GGS d'essais*

Les essais manuels ou avec drone en laboratoire décrits dans le chapitre 5 permettront de valider ces GGS ou d'apporter des modifications pour les rendre les plus précis et ergonomiques possibles.

# Chapitre 5: Essais en laboratoire



Dans les chapitres précédents, le développement, l'étude et la mise en œuvre de la typologie d'éléments DEPT<sup>5</sup> et ses GGS<sup>6</sup> associés ont été présentés. L'étape suivante consiste en la réalisation d'essais, dont l'objectif est de déterminer les défauts et les améliorations nécessaires de cette typologie et des technologies de pose utilisées. Des essais ont donc été réalisés au LEMSC<sup>7</sup> en utilisant les DEPT d'essais produits et les trois GGS d'essais fabriqués.

Dans la section qui suit, les essais de préhension à la main de DEPT seront brièvement résumés. Ils ont été réalisés afin de valider les systèmes de préhension conçus et équipant les GGS avant leur utilisation avec drone.

Il sera ensuite question des premiers essais de construction de murs de DEPT, d'abord à la main, puis par l'utilisation manuelle des GGS. Plusieurs conclusions résultant des essais de préhension et de pose déboucheront sur des modifications et améliorations des systèmes développés, en vue d'assurer leur bon fonctionnement lors des essais suivants avec drone.

Une fois les systèmes et les blocs coulés au point, les essais de préhension, de pose et de construction de murs de DEPT par drone ont été effectués et seront décrits dans la troisième section de ce chapitre.

La quatrième et dernière section s'intéressera aux essais de résistance et de stabilité réalisés sur le DEPT : essais de résistance à la compression de DEPT seuls, essai de résistance à la compression de murs composés, essais de stabilité.

---

<sup>5</sup> Pour rappel, le DEPT ou Drick Extrudable Progressive Triangular est la typologie étudiée présentée et décrite en section 2.1

<sup>6</sup> Pour rappel, les GGS ou Gripping and Guiding System sont les systèmes de préhension et de guidage faisant lien physique entre les DEPT et les drones en vol (Chapitre 3)

<sup>7</sup> Laboratoire d'Essais Mécaniques, Structures et Génie Civil (UCL)

## 5.1. Essais manuels de préhension

Les essais décrits ci-dessous ont permis d'expérimenter le fonctionnement des trois systèmes de préhension et de guidage conçus précédemment et des éléments de guidage longitudinal et latéral en préhension. Ceux-ci ont été effectués en laboratoire sur les DEPT d'essais coulés et par l'actionnement manuel des GGS. Des conclusions en seront tirées donnant lieu à l'amélioration de certains systèmes.

### 5.1.1. GGS-EM

Lors des essais effectués par A. Naveau et A. Moncourrier et par JF. Leboutte et V. Parisel dans le cadre de leur TFE (4) (3), les éléments développés étaient testés via l'utilisation d'électro-aimants en guise de système de préhension. C'est donc le premier système qui a été développé et les premiers DEPT d'essais fabriqués (DC03 et DC04 et DC09 à DC19) ont été équipés de plaquettes métalliques (section 4.1.3.1).

Les essais de préhension du GGS-EM ont été réalisés le 13 décembre 2017. Notons que le GGS-EM est alors dépourvu de son système de guidage (Figures 226).



*Figures 226 - Essais manuels de préhension du GGS-EM*

Ce test consiste simplement en la mise en place du système de préhension sur le DEPT et le verrouillage/déverrouillage des électro-aimants est assuré par un interrupteur coupant ou pas leur alimentation. Le bloc peut alors être soulevé si le système est bien fonctionnel.

Cet essai a dévoilé une sous-estimation de l'épaisseur des plaquettes d'acier ancrées dans les DEPT. L'épaisseur utilisée (3mm d'acier) ne suffit que tout juste à assurer le soulèvement des 13kg des DEPT les plus lourds testés. Les éléments étant soumis à des accélérations centrifuges lors d'essais par drone, il était alors indispensable de réévaluer l'épaisseur d'acier utilisée.

Cette conclusion a conduit à la réalisation d'un essai de chargement des électro-aimants qui a permis d'évaluer la force électromagnétique en fonction de l'épaisseur de la plaque d'acier utilisée (annexe B.4).

### 5.1.2. GGS-G

L'essai de préhension du GGS-G a été effectué le 19 avril 2018. Les DEPT DC13 à DC22 (excepté les DC18 et DC22) ont alors été utilisés, possédant des dimensions précises (épaisseur et longueur de la face supérieure).

Deux problèmes se sont présentés :

- le mauvais fonctionnement des guides de reprise d'imprécision latérale lors de la préhension ; le GGS-G ne se plaçant pas correctement sur les blocs lors de la préhension, menant alors à une fermeture non-symétrique sur l'élément de la pince lors du levage (Figure 227) ;

- le contact des rails de guidage latéraux de pose avec le sol lors de la fermeture de la pince (Figure 228).



Figure 227 - Rails de guidage latéral initiaux



Figure 228 - Contact avec le sol lors de la fermeture de la pince

Pour pallier à ces deux problèmes empêchant la bonne préhension des éléments, de nouveaux guides de reprise d'imprécision latérale de préhension ont été fabriqués et ajoutés au GGS-G (Figure 229) et les rails de guidage latéral de pose ont été raccourcis.



Figure 229 - Rails de guidage latéral de pose en préhension modifiés

### 5.1.3. GGS-T

Plusieurs DEPT d'essais compatibles au GGS-T ont ensuite été fabriqués et utilisés pour un essai de préhension (DC20 à DC27). L'essai a été réalisé le 19 avril 2018 avec le système de rotation de tiges de forme T placé manuellement en position ouverte ou fermée. A noter que le GGS-T était alors déjà équipé de son système de guidage (Figure 230).



Figure 230 - GGS-T utilisé lors des essais manuels de préhension

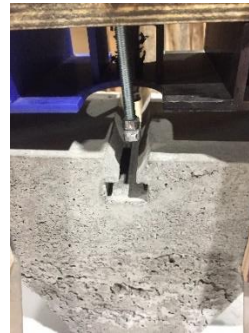


Figure 231 - Essai de préhension avec tige de forme T

L'objectif est alors de vérifier si les dimensions des tiges T et des rainures dans les DEPT d'essais permettent une pénétration des tiges, leur rotation et leur sortie des rainures sans obstruction. L'essai

ayant présenté quelques blocages lors de ces processus, il a conduit à l'adaptation des dimensions des éléments composants : élargissement et ponçage de la rainure des DEPT d'essais (Figure 232), diminution de l'épaisseur des tiges en forme T (Figures 233) et ajout d'un congé dans les éléments horizontaux des tiges (Figure 234).



Figure 232 - Ponçage des angles de la rainure



Figures 233 - Diminution de l'épaisseur de la tige



Figure 234 - Ponçage et ajout de congé aux éléments horizontaux

Le DC23, possédant une rainure mal centrée dans sa face supérieure, s'est avéré inutilisable pour les essais avec GGS-T (Figure 235).



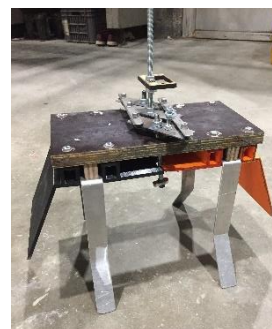
Figure 235 - DC23 possédant une rainure excentrée

## 5.2. Essais manuels de pose

Les systèmes de préhension des trois GGS ayant été testés et améliorés, la phase des essais de pose manuels a été réalisée. Le but étant ici de vérifier si les systèmes de reprise d'imprécision latérale de pose jouent leur rôle comme prévu et de relever les caractéristiques et les défauts des murs obtenus.

### 5.2.1. Essais avec le GGS-EM et le GGS-T

Le GGS-EM et le GGS-T utilisent un même système de guidage latéral de pose, ajouté de la même manière au GGS. Les rails de guidage sont implantés dans les éléments de guidage longitudinal imprimés en 3D (Figures 236). Les systèmes de préhension sont activés manuellement lors des essais.



Figures 236 - GGS-EM et GGS-T d'essai utilisés

Les essais consistent à construire, bloc par bloc, un mur, simulant manuellement la préhension, le transport et la pose par drone. Une structure servant de base aux essais, composés de DEPT-b (section 2.5.1) fabriqués en laboratoire, a été installée (Figures 237). Pour s'assurer de la bonne tenue des essais, les DEPT-b y ont été mis à niveau.



*Figures 237 - Plateforme de base des essais*

Les essais avec le GGS-EM ont été réalisés le 29 mars 2018. Les blocs d'essais DC12 à DC19 ont été utilisés et plusieurs montages de murs ont été effectués, qui diffèrent par l'ordre des éléments placés (Figures 238).



*Figures 238 - Configuration des essais avec GGS-EM et exemples de murs obtenus*

En plus de vérifier et mesurer la précision du système de guidage latéral, les angles par rapport à l'horizontale et par rapport à la verticale, les espaces inter-éléments et les défauts notables du mur obtenus ont été mesurés. Les résultats de ces essais sont disponibles en Annexe C.1 (Essais EM1 à EM6).

Les essais avec le GGS-T ont eu lieu le 25 avril 2018 avec l'utilisation des DC20 à DC27 (excepté le DC23) et la plateforme de base d'essai illustré ci-avant (Figures 239). Les mesures effectuées sont les mêmes que lors des essais avec GGS-EM et les résultats sont disponibles en Annexe C.1 (essais T1 à T3).



*Figure 239 - Configuration des essais avec GGS-T et exemples de murs obtenus*

Ces deux phases d'essais convergent dans les constats qui en découlent.

Premièrement, les systèmes de guidage latéral sont fonctionnels, mais la précision atteinte dépend forcément de l'espacement placé entre les rails de guidage. Comme il est expliqué en section 3.3.1, un espacement trop élevé induit un décalage latéral élevé entre les DEPT, tandis qu'un espacement trop

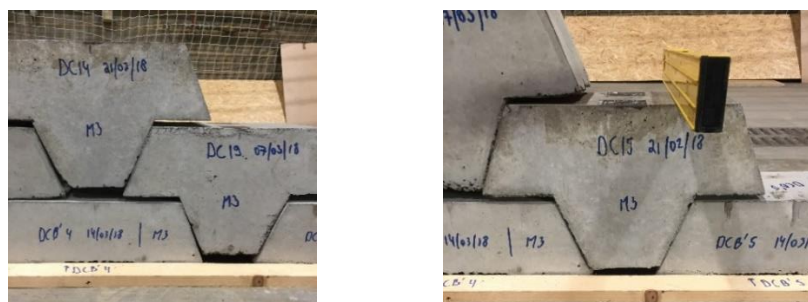
faible risque de rendre impossible la préhension d'élément à l'épaisseur  $e$  légèrement supérieure à 150mm. Le Tableau 11 illustre l'influence de l'espacement sur ces deux résultats.

Une solution permettant d'obtenir à la fois des décalages suffisamment faibles tout en assurant la préhension de tous les éléments a ensuite été imaginée et proposée en section 3.3.4.

| Essais considérés                          | EM1-EM2 et T1 | EM3-EM6 et T2-T3 |
|--------------------------------------------|---------------|------------------|
| Espacement des rails de guidage (mm)       | 154           | 151.5            |
| Décalage moyen entre DEPT (mm)             | 4,69          | 2,35             |
| Blocs saisis sans application de force (%) | 100%          | 71,4%            |

Tableau 11 - Résultats des essais manuels de pose en fonction de l'espacement des guides latéraux

Deuxièmement, des espaces entre les blocs supérieurs et inférieurs ont été observés dans la plupart des essais (Figures 240). Ces espacements verticaux, atteignant jusqu'à 17mm, sont une conséquence directe de l'imprécision dimensionnelle de fabrication des DEPT d'essais. La valeur de la longueur de base  $a$  est dans plusieurs cas trop élevée et la pose complète du bloc sur les blocs inférieurs est alors empêchée.



Figures 240 - Espacements verticaux entre blocs

Des essais ont alors été effectués en augmentant la distance entre les DEPT-b composant la plateforme d'essai (essais EM5-EM6 et T3). Le Tableau 13 résume la différence de résultats obtenus.

| Essais considérés                | EM1-EM4 et T1-T2 | EM5-EM6 et T3 |
|----------------------------------|------------------|---------------|
| Espacement des DEPT-b (mm)       | 102              | 105           |
| Espacement verticaux moyens (mm) | 9,61             | 3,22          |

Tableau 12 - Résultats des essais manuels de pose en fonction de l'espacement des DEPT-b

On constate que l'augmentation de l'écart entre les blocs DEPT-b induit la formation d'autres espacements entre les blocs du mur (Figure 241).



Figure 241 - Espacements résultants de l'écart entre DEPT-b

### 5.2.2. Essais avec le GGS-G

Le GGS-G comporte un système de reprise de l'imprécision latérale de pose différent des GGS-EM et GGS-T. La différence réside dans la fixation des rails de guidage utilisés : ils sont fixés à la pince de levage qui s'ouvre et se ferme pour la préhension des éléments (Figure 242).

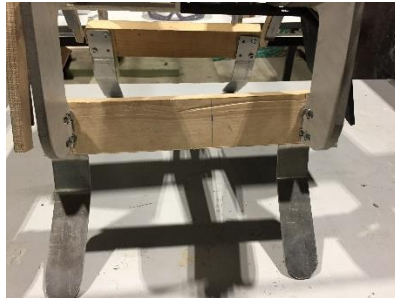


Figure 242 - Rails de guidage latéral du GGS-G

Des essais de montage de mur à l'aide du GGS-G ont eu lieu le 26 avril 2018. Les DEPT d'essais utilisés sont les mêmes que lors des essais avec GGS-EM (DC12 à DC19). Les résultats de ces essais sont disponibles en Annexe C.1 (essais G1 à G2).

Ils ont mis en évidence le bon fonctionnement global du système de préhension. Quant au système de guidage, les essais ont montré des décalages latéraux entre les DEPT équivalents que à ceux obtenus lors des tests précédents avec GGS-EM (Tableau 13).

| GGS utilisé                 | GGS-EM | GGS-G |
|-----------------------------|--------|-------|
| Décalage latéral moyen (mm) | 2,90   | 2,88  |

Tableau 13 - Comparaison du décalage latéral de pose moyen entre GGS-EM et GGS-G

Le système de guidage du GGS-G diffère cependant de celui du GGS-EM : les rails de guidage sont fixés à la pince de levage. Leur espacement lors de la pose dépend donc directement de l'espacement des parois de la pince et donc de l'épaisseur du bloc saisi (Figure 243).

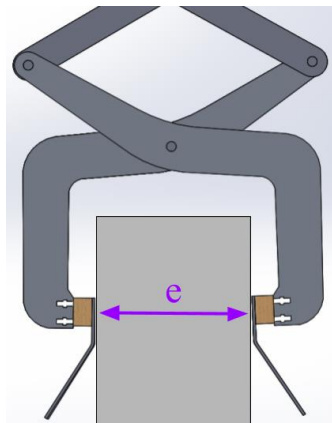


Figure 243 - Espacement des rails de guidage influencé par l'épaisseur de l'élément saisi

Aucune solution dans la modification du GGS-G ne paraît possible pour éviter le problème. Le seul moyen est en fait d'obtenir des éléments avec une précision d'épaisseur maximale.

### 5.2.3. Essais avec le GGS-G et DEPT à rainures verticales

Afin de corriger le décalage latéral de pose obtenu lors des essais précédents, une solution a été proposée et est expliquée en section 3.3.4. Des DEPT d'essais comportant des rainures verticales au niveau des rails de guidage latéraux ont été fabriqués et des essais ont été effectués avec le GGS-G.

Les résultats de cet essai sont résumés en Annexe C.1 (essais G'1 à G'3). Le Tableau 14 compare les décalages moyens obtenus avec et sans rainure.

| Essais considérés           | Sans rainure et<br>espacement de<br>151,5mm | Avec rainure et<br>espacement de 148mm |
|-----------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------|
| Décalage latéral moyen (mm) | 2,19                                        | 1,06                                   |

Tableau 14 - Comparaison du décalage latéral de pose moyen entre DEPT sans et avec rainures

On constate que le système avec des éléments à rainures verticales latérales et une réduction de l'espacement entre les rails de guidage permet de réduire au millimètre le décalage latéral de pose moyen.

### 5.2.4. Conclusion

Deux constats communs ressortent de ces 4 séries de tests, avec GGS-EM, GGS-T, GGS-G et GGS-EM avec DEPT rainurés.

D'abord, le décalage latéral de pose mesuré entre les éléments est difficile à réduire avec l'utilisation d'éléments dont la dimension épaisseur n'est pas obtenue précisément. L'ajout de rainures dans ceux-ci permet de diminuer encore ce décalage mais les murs construits possèdent toujours une planéité non-acceptable pour la construction de structures réelles.

Ensuite, des espacements verticaux apparaissent entre éléments posés et éléments supérieurs : ici, c'est l'imprécision de la dimension de la longueur de la base qui est en cause. Le contact entre face supérieure du DEPT inférieur et la base du DEPT posé n'est pas assuré et la résistance à la compression du mur réalisé sera forcément influencée. La solution est d'espacer directement les éléments servant de base aux essais, ou de diminuer la dimension en question dans les éléments fabriqués. Cela dit, d'autres espacements apparaissent et rendent alors le mur trop perméable. Les essais de résistance décrits en section 5.4.1 donneront lieu à de nouvelles conclusions sur le sujet.

La conclusion globale de ces essais est donc l'importance d'utiliser des éléments fabriqués avec une précision dimensionnelle maximale. Et plus que pour les éléments de maçonnerie traditionnelle, puisqu'il n'y a pas dans la construction par drone l'utilisation de mortier corrigeant ces imprécisions dimensionnelles.

## 5.3. Essais avec drone

Cette section présente les deux phases d'essais réalisés avec drone, consistant en la construction d'un mur de DEPT d'essais par utilisation exclusive du drone d'essai. Le drone a été piloté par Mr. Michaël Daris, pilote expérimenté de drones.

La validation de la typologie du DEPT et de ses GGS associés constitue l'objectif de ses essais.

### 5.3.1. Essais avec le GGS-EM

Les essais avec le GGS-EM ont eu lieu le 28 mai 2018. La plateforme d'essais est composée de DEPT-b placés correctement à niveau et les blocs assemblés sont les DC12 à DC19.

Avant d'effectuer les essais, le GGS-EM a été fixé au drone par sa tige filetée d'attache, boulonnée dans la partie inférieure du châssis du drone. Les électro-aimants ont ensuite été raccordés et sont déclenchés par activation d'un interrupteur relié à un servomoteur (Figures 244 et 245).



Figure 244 - GGS-EM fixé au drone d'essai

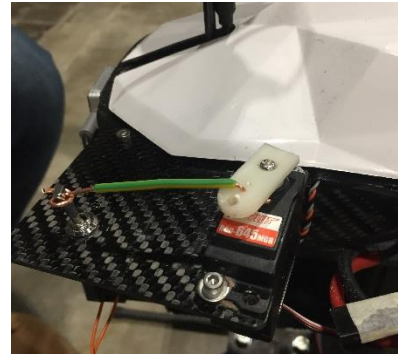


Figure 245 - Commande des électro-aimants par interrupteur activé par un servomoteur

L'essai consiste en la saisie des éléments, leur transport vers leur lieu de pose et leur pose sur les blocs inférieurs (Figures 246). Des vidéos complètes de ces essais peuvent être fournies sur demande.



Figures 246 - Photos d'essai: phase de préhension, transport et pose d'élément

Le test s'est avéré rapidement très concluant : 4 DEPT ont été assemblés sans trop de difficulté pour le pilote et le drone. Les décalages latéraux obtenus sont inférieurs à 3mm (Figures 247).



Figures 247 - Mur de DEPT construit par drone avec le GGS-EM

Cet essai permet de valider la typologie DEPT et le GGS-EM, qui donnent lieu à des préhensions, transports et poses simples et efficaces et des assemblages propres.

### 5.3.2. Essais avec le GGS-G

Suite aux essais avec drone du 28 mai 2018, des modifications ont été apportées au GGS-G. Des assemblages par double-écrous ont été ajoutés au système et un rail de rigidification en bois a été placé au sein du GGS-G pour limiter le tangage observé (Figure 248 et 249).



Figures 248 - Tangage observé lors de l'essai du 28 juin 2018



Figure 249 - Insertion d'un rail de guidage anti-tangage

Le GGS-G amélioré a alors été testé lors d'un second essai le 5 juin 2018. La base d'essai est alors la même qu'avec le GGS-EM (DEPT-b) mais des DEPT fabriqués avec le moule 4 ont été préférés à ceux fabriqués avec les moules 2 et 3. Le DC31, DC33, DC35 et DC37 ont donc servis à effectuer ce test ainsi que les DC17 à DC19 (Figure 251).

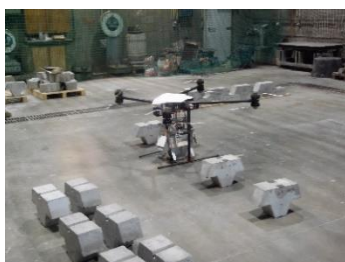


Figure 250 - Drone équipé du GGS-G



Figures 251 - Installation d'essai: base d'essai, DEPT utilisés et drone avec GGS-G

La vidéo de l'essai réalisé peut être fournie sur demande. Les images en Figures 252 illustrent le bon déroulement de l'essai.



Figures 252 - Déroulement de l'essai drone et GGS-G

Au total, 7 DEPT ont été placés sur la base d'essai : 4 DEPT fabriqués avec moule 4 à l'étage 1 et 3 DEPT de moule 3 à l'étage 2 (Figure 253).



Figure 253 - Mur obtenu par essai par drone et GGS-G

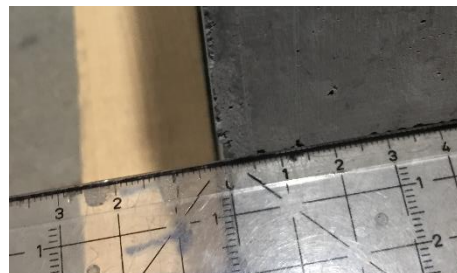


Figure 254 - Décalage latéral type entre base et 1er étage



Figure 255 - Décalage latéral type entre 1er étage et 2ème étage

On observe une très grande différence entre les décalages latéraux de pose obtenus en fonction des DEPT posés (Figure 254, Figure 255 et Tableau 15).

| DEPT d'essais utilisés      | Fabriqué avec moule 4 | Fabriqué avec moule 3 |
|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Décalage latéral moyen (mm) | 0,75                  | 14                    |

Tableau 15 - Comparaison des décalages latéraux en fonction du type de DEPT posé

Cette différence provient de deux facteurs :

- le pilote indique que la mise en place est plus aisée pour les éléments du 1<sup>er</sup> étage, le drone pouvant d'appuyer sur le sol pour décoller sans basculer au décollage ;
- la préhension d'éléments à l'épaisseur légèrement trop faible induit un espacement entre la plateforme du GGS-G et le DEPT lui-même (Figure 256) ; avec comme conséquence une surélévation du système de guidage latéral par rapport aux DEPT déjà posés qui servent d'appuis au guidage latéral.



Figure 256 - Espacement vertical entre le DEPT et le GGS

Les résultats obtenus de cet essai sont cela dit très encourageants. Le pilote du drone a d'ailleurs émis son avis positif à propos du GGS-G à l'opposé du GGS-T. Les avantages du GGS-G diagnostiqués pendant l'essai sont :

- la facilité lors de la préhension de l'élément grâce à son empattement plus grand lié à l'ouverture de la pince ;
- sa robustesse ;
- la simplicité de son système de préhension par auto-serrage.

Cela dit, une fois l'élément saisi par auto-serrage de la pince par gravité, il reste accroché au drone tant qu'il n'est pas mis à nouveau en contact avec le sol. Il semble donc indispensable de prévoir un mécanisme permettant de lâcher l'élément si un problème survient en vol ou lors de la pose.

### 5.3.3. Essais avec le GGS-T

Les premiers essais effectués le 28 mai 2018 avec le GGS-T se sont conclus par la nécessité de modifier le système : les vibrations créées par le drone et transmises au système induisent le desserrage des écrous et la mise hors service du système de préhension par rotation de tiges en forme T. Le GGS-T a donc été modifié en ajoutant des serrages par double-écrous permettant d'éviter ce phénomène (Figure 257).



Figure 257 - Serrage par double-écrous

Des nouveaux essais après modifications ont été effectués le 5 juin 2018. L'essai a été mené avec une base d'essai composée de DEPT-b et d'un étage de DEPT fabriqués avec le moule 4, et donc possédant une précision dimensionnelle de réalisation élevée. Les DC20 à DC26 (excepté le DC23) ont été utilisés pour l'essai de préhension, transport et pose par drone (Figure 259).



Figure 258 - Drone équipé du GGS-T



Figures 259 - Installation d'essai: base d'essai, DEPT utilisés et drone avec GGS-T

L'essai a été réussi et des photos des phases préhension, transport et pose sont données en Figure 260.



*Figures 260 - Phase de préhension, transport et pose du DEPT d'essai*

Le système est donc fonctionnel, mais plusieurs difficultés se sont présentées lors de la préhension du DEPT, qui demande une précision plus importante du pilotage du drone. De plus, le mécanisme de transfert de la rotation du servomoteur vers les tiges de forme T décrites en section 4.2.4 doit pouvoir être amélioré, en utilisant par exemple des engrenages.

La robustesse du GGS-T d'essai, de par ce mécanisme, est trop faible pour envisager son utilisation répétée et efficace dans une fonctionnalité prolongée en grandeur nature. Mr. Daris, pilote d'essai mais également spécialiste des drones, a émis ses réserves concernant ce système, mentionnant notamment la complexité inutile du mécanisme et son manque d'ergonomie dans les phases de préhension et de pose.

#### 5.3.4. Conclusion

Les essais effectués et présentés dans cette section ont permis de valider la fonctionnalité des 3 GGS : le drone peut, à l'aide de chacun de ceux-ci et piloté par un pilote aguerri, mettre en place des DEPT avec un positionnement précis. Les murs obtenus ont un bon rendu visuel, du moins meilleur que celui atteint avec les dricks développés précédemment.

Les décalages latéraux de pose, difficiles à réduire même lors des essais de pose manuels (section 5.2), sont faibles par rapport à la correction de l'imprécision exigée en laboratoire (5cm). L'utilisation des DEPT à l'épaisseur précise et une correction optimale de l'espacement des guides latéraux pourraient permettre de réduire ces décalages pour les rendre acceptables.

Il est maintenant possible, après la réalisation de ces essais, de comparer les GGS développés sur base de tous les critères développés en section 3.1 (Tableau 16). A noter qu'on tient compte ici des améliorations possibles des GGS.

| Critère                                          | GGs-EM                           | GGs-T                  | GGs-G                             |
|--------------------------------------------------|----------------------------------|------------------------|-----------------------------------|
| Modification du bloc                             | Nécessaire                       | Nécessaire             | Pas nécessaire                    |
| Essai avec drone (observation et avis du pilote) | Validé                           | Pas validé             | Validé                            |
| Robustesse                                       | Robuste                          | Peu robuste            | Robuste                           |
| Fabrication du mécanisme                         | Simple                           | Complexe               | Complexe                          |
| Fonctionnement                                   | Simple                           | Simple blocage courant | Simple                            |
| Poids                                            | 3,813kg (et difficile à réduire) | 2,285kg                | 4,473kg (mais facile à réduire)   |
| Encombrement                                     | Faible                           | Faible                 | Moyen                             |
| Energie nécessaire                               | Moyenne                          | Faible                 | Faible                            |
| Sécurité                                         | OK                               | OK                     | Pas OK (mais adaptation possible) |

Tableau 16 - Comparaison des GGS d'essais

Le critère de la nécessité de devoir modifier le bloc est le critère le plus important, puisqu'on tend dans ce travail à obtenir les éléments les plus simples possibles :

- l'ajout des plaquettes métalliques dans tous les éléments (GGs-EM) augmente sensiblement leur coût ;
- l'intrusion d'une fente dans tous les éléments (GGs-T) donne lieu à des murs troués et perméables ou nécessite de les reboucher après la pose.

Seul le GGS-G ne possède pas cet inconvénient. De plus, ses points faibles s'avèrent peu nombreux et sans gravité sur sa fonctionnalité, son ergonomie et son coût de fabrication et d'utilisation. Le seul défaut notable du GGS-G est sa complexité. Il s'élève toutefois comme le système le plus prometteur des 3 développés dans ce travail.

Les atouts du GGS-G en font un système qui, après un développement plus en profondeur et la correction de ses défauts en terme de poids et de sécurité, pourrait s'avérer comme la solution la plus prometteuse et respectant au maximum le cahier des charges dressé en section 3.1. L'auteur encourage alors les prochains intervenants sur le sujet à axer leurs efforts sur ce GGS.

## 5.4. Essais de résistance et de stabilité

En complément à ces travaux, des essais de résistance et de stabilité ont été effectués sur les DEPT et sur des murs composés de DEPT. Ils ont été réalisés pour tester la composition de béton utilisée pour la fabrication des éléments d'essai, pour déterminer les mécanismes de rupture apparaissant dans plusieurs configurations de chargement et également à titre illustratif.

## 5.4.1. Essais de résistance à la compression

### 5.4.1.1. Essais sur DEPT simple

Afin de déterminer le chargement maximal acceptable des DEPT et le mécanisme de rupture dans plusieurs configurations, 6 essais de compression ont été réalisés le 30 mai 2018. Un DEPT a été testé à chaque essai.

Plusieurs cas de chargement et de reprise de la charge ont été imaginés et combinés :

- reprise de la charge par la base du DEPT (Figure 262) ou par ses ailes (Figure 263).
- chargement par la base du DEPT supérieur (a) (Figure 265), par les ailes des DEPT supérieurs (b) (Figure 264) ou chargement combiné des DEPT (a) et (b) (Figure 266).

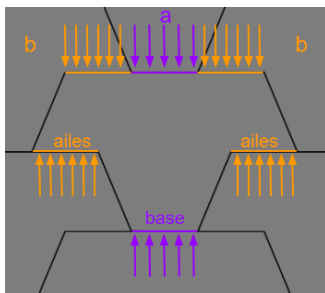


Figure 261 - Forces exercées le DEPT (hors frottement sur les faces de glissement)

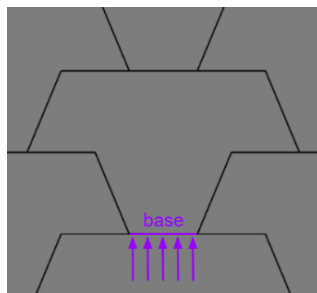


Figure 262 - Reprise par la base

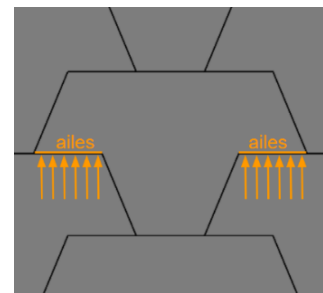


Figure 263 - Reprise par les ailes

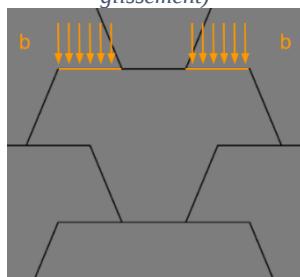


Figure 264 - Chargement par les ailes des DEPT supérieurs

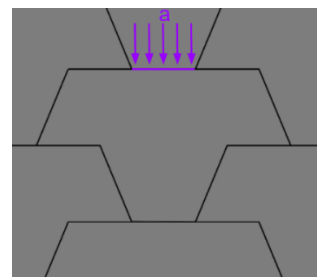


Figure 265 - Chargement par la base du DEPT supérieur

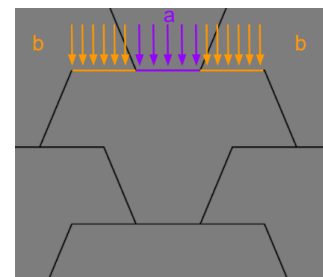


Figure 266 - Chargement composé

Les 6 cas possibles de reprise/chargement sont repris ci-dessous et ont fait l'objet d'un essai sur une presse hydraulique en laboratoire LEMSC. La presse de 10 tonnes n'étant pas suffisante pour atteindre la rupture de certains cas, une presse de 500 tonnes a été utilisée (Figure 267), ne permettant d'obtenir que la charge à la rupture avec un degré de précision relativement faible (à 100kg près).



Figure 267 - Presse utilisé lors des tests

### Cas 1 : Chargement par les ailes des DEPT supérieurs et reprise par la base



Figures 268 - Cas 1: Schéma du cas expérimenté, dispositif d'essai et DEPT avec fissuration avant rupture

L'essai a été effectué sur le DC01. Comme attendu, une fissure est vite apparue au centre du DEPT (Figure 268), à 2,3T (22,9kN), menant à sa rupture à 2,5T (24,9kN).

### Cas 2 : Chargement par les ailes des DEPT supérieurs et reprise par les ailes



Figures 269 - Cas 2: Schéma du cas expérimenté, dispositif d'essai et DEPT avec fissuration avant rupture

L'essai a été effectué sur le DC03. La fissure visible sur la Figure 269 s'est présentée dès 2,2T (21,9kN) mais il a fallu attendre 16,9T (168,4kN) pour atteindre la rupture du DEPT.

### Cas 3 : Chargement par la base du DEPT supérieur et reprise par la base



Figures 270 – Cas 3 : Schéma du cas expérimenté, dispositif d'essai et DEPT avec fissuration avant rupture

L'essai a été effectué sur le DC08. Des fissures verticales au centre du DEPT sont alors observés à partir de 22T (219,2kN), mais le test a été interrompu pour éviter la déformation de la poutre d'acier utilisée. Le photo ci-dessus a été prise au chargement maximal atteint de 29,9 tonnes (297,9kN). Ce chargement correspond à une résistance à la compression de  $\frac{297900[N]}{15000mm^2} = 19,86[MPa]$ , une résistance totalement acceptable au regard de celle des éléments de maçonnerie traditionnelle.

#### Cas 4 : Chargement par la base du DEPT supérieur et reprise par les ailes



Figures 271 - Cas 4: Schéma du cas expérimenté, dispositif d'essai et DEPT avec fissuration avant rupture

L'essai a été effectué sur le DC07. Cet essai a été effectué sur la presse de 10T. Les fissures créées apparaissent alors au niveau de l'angle entre la surfaces de glissement inférieures et les ailes du DEPT. La rupture a eu lieu à 7,6T (75,7kN).

#### Cas 5 : Chargement combiné et reprise par la base



Figures 272 - Cas 5: Schéma du cas expérimenté, dispositif d'essai et DEPT avec fissuration avant rupture

L'essai a été effectué sur le DC05. Au fur et à mesure du chargement, les fissures verticales entre la face supérieure et la base du DEPT sont apparues. La rupture a eu lieu à 23,3T (232,2kN) lorsque le DEPT a été complètement écrasé. Ce chargement correspond à une résistance à la compression de  $\frac{232200[N]}{15000mm^2} = 15,48[MPa]$ , une résistance totalement acceptable au regard de celle des éléments de maçonnerie traditionnelle.

#### Cas 6 : Chargement combiné et reprise par la ailes



Figures 273 - Cas 6: Schéma du cas expérimenté, dispositif d'essai et DEPT avec fissuration avant rupture

L'essai a été effectué sur le DC06. Des fissures se sont présentées après 5,6T (55,8kN) au niveau de l'angle entre surfaces de glissement inférieures et ailes du DEPT. La rupture a été observée à 19,4T (193,3kN).

## Conclusion

Le but premier de ces essais était d'évaluer la résistance à la compression du DEPT et la résistance du béton à base d'Argex concassé utilisé pour la fabrication des éléments d'essai. On remarque que les valeurs obtenues sont du même ordre de grandeur que celles utilisées dans la maçonnerie traditionnelle telle que les parpaings en béton (entre 6 et 12MPa).

Concernant les mécanismes de rupture, on observe, pour les cas de chargement 2, 4 et 6 où la charge est reprise par les ailes du DEPT, l'apparition des fissures au même endroit. Les angles entre les faces de glissement inférieures et les ailes constituent une discontinuité dans la forme de l'élément et sont donc le lieu d'une concentration de contraintes. L'orientation et l'inclinaison des fissures diffèrent cependant des cas de chargement expérimentés (Figures 274).



Figures 274 - Fissuration au niveau de l'angle avec différentes inclinaisons selon le type de chargement

Les fissures qui apparaissent dans les cas de chargement 1, 3 et 5 où la charge est reprise par la base sont également similaires puisqu'elles sont centrées et verticales (Figures 275).



Figures 275 - Fissuration verticale des éléments avec reprise de charge à la base

Les mécanismes de rupture observés dans cette section semblent logiques et ne diffèrent pas de ceux observables pour des éléments en béton classique.

L'autre constat concerne la différence notable de résistance maximale atteinte en fonction de la transmission de l'effort. Dans les cas 2, 3, 5 et 6, la charge est transmise verticalement vu la configuration des essais. Dans les deux autres cas, la charge est transmise des extrémités de la face supérieure vers la base (cas 1) ou du centre de la face supérieure vers les ailes (cas 4). Le Tableau 17 résume la différence de chargement à la rupture.

| Cas considérés                  | Cas 2, 3, 5 et 6 | Cas 1 et 4 |
|---------------------------------|------------------|------------|
| Charge de rupture maximale (kN) | 297,9            | 75,7       |
| Charge de rupture minimale (kN) | 168,4            | 24,9       |
| Charge de rupture moyenne (kN)  | 221,9            | 50,3       |

Tableau 17 - Comparaison des résultats de charge à la rupture selon le type de transmission

On veillera alors, dans un mur de DEPT, à éviter la transmission de charges tels que dans les cas 1 et 4.

#### 5.4.1.2. Essais sur un mur de DEPT

Pour obtenir le mécanisme de rupture qui apparait lors du chargement d'un mur constitué de DEPT, un essai de compression a été effectué le 30 mai 2018 au LEMSC.

Le mur testé est constitué de 4 DEPT-b et de 6 DEPT d'essais. Il était important, pour obtenir des résultats pertinents, d'utiliser des éléments les mieux assemblés possibles et par conséquent des éléments aux dimensions les plus proches de celles du modèle d'essai. C'est la raison pour laquelle le moule imprimé en 3D a été réalisé (section 4.1.1.4). Les éléments utilisés pour cet essai sont les DC31 à D37 (excepté le DC35), fabriqués à l'aide de ce moule et dont la précision des dimensions est de 99,5% (Annexe B.1).

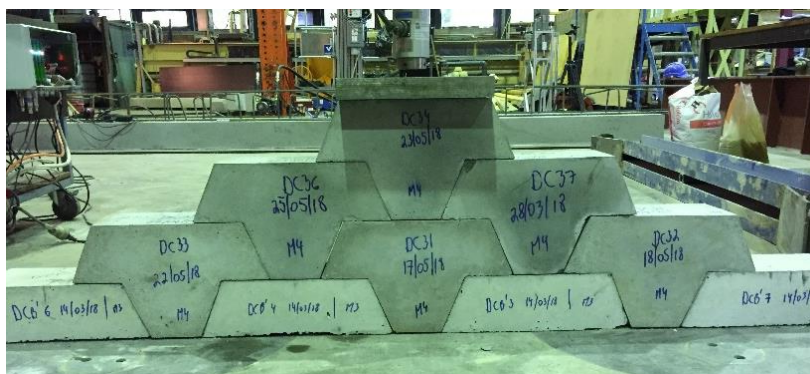


Figure 276 - Mur de DEPT d'essai

On constate que le mur monté comporte très peu d'espacements verticaux et les éléments sont placés manuellement avec un décalage latéral minimal.

L'essai est effectué avec la presse 10T du LEMSC. Les résultats sont disponibles en Annexe C.3.

Le mur a été chargé uniformément sur la face supérieure du DC34 en tête de celui-ci. L'essai a été effectué jusqu'aux limites de la presse utilisées (93,7kN), mais a permis de constater l'apparition de fissures au niveau des angles entre faces de glissement et ailes des éléments DC31, DC36 et DC34. Le déplacement atteint est faible (5,14mm) par rapport aux déformations attendues vu la géométrie et le type d'assemblage du mur.



Figures 277 - Fissures observées (vue de face et vue de derrière)

L'analyse du graphe donné en Figure 278 renseigne la formation de la première fissure à 31,0kN, la seconde à 38,0kN et la troisième à 48,8kN.

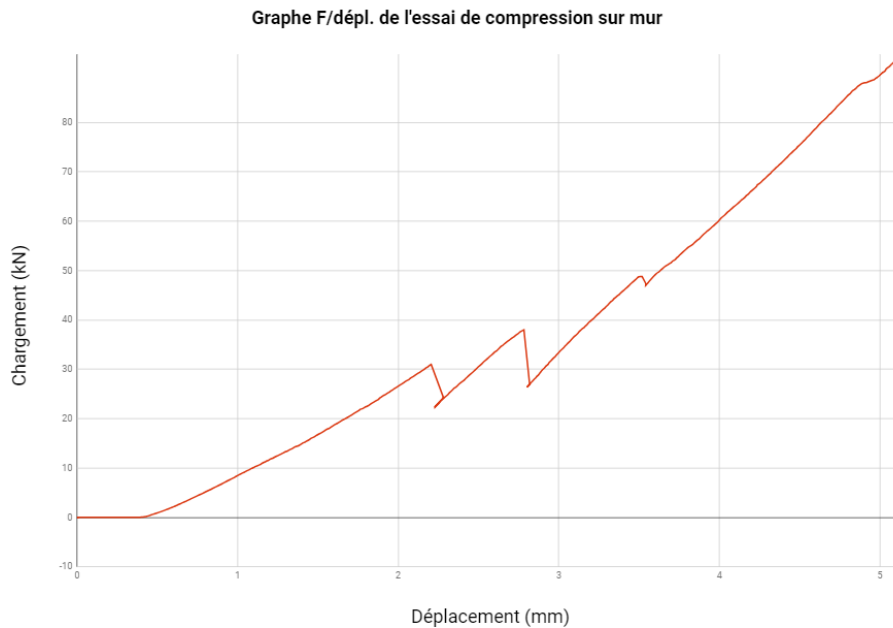


Figure 278 - Résultats de l'essai de compression

Cette observation confirme le fait que ces angles concaves constituent les points faibles des DEPT.

Sur base des essais de compression sur DEPT simples décrits en section 5.4.1.1, on peut prédire que si l'essai avec été réalisé jusqu'à la rupture finale du mur, la charge à la rupture aurait atteint une valeur dans le même ordre de grandeur que les cas 3 et 5.

#### 5.4.1.3 Conclusion

Les essais de compression de DEPT simples et l'essai de compression d'un mur de DEPT permettent de définir la manière de prévoir les dimensions finales du DEPT et son assemblage en mur afin d'en tirer une résistance globale maximale.

En effet, les constats suivants découlent de ces essais :

- les angles concaves constituent les points faibles de la géométrie du DEPT ;
- ces angles concaves sont touchés par la formation de fissures lorsque la charge est reprise par les ailes du DEPT ;
- les deux essais à la charge de rupture les plus élevées sont les cas 3 et 5, où la charge est transmises verticalement et est reprise par la base du DEPT ;
- l'essai sur un mur de DEPT à la précision dimensionnelle élevée (99,5%) montre d'abord la formation de fissures au niveau des angles

Ces constats convergent alors vers une conclusion : un mur de DEPT sera plus résistant et présentera moins de fissuration en charge au niveau de ses angles concaves si on concentre la transmission de la charge de la face supérieure vers la base des éléments. Les charges doivent alors être transmises d'étage à étage de blocs entre la base du bloc supérieur et le centre de la face supérieure du bloc inférieur (Figure 279).

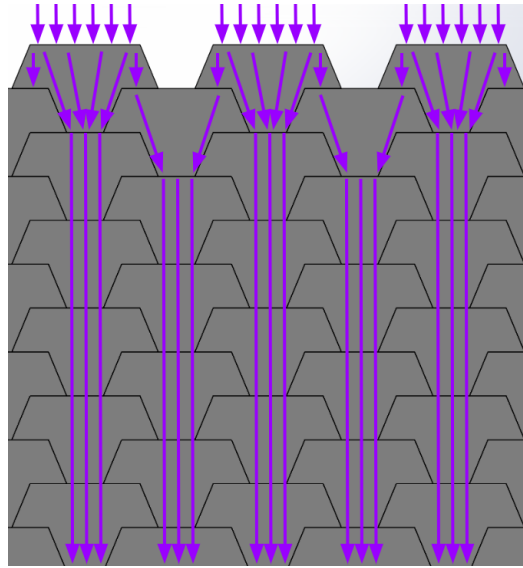


Figure 279 - Transmission de charge optimale dans un mur de DEPT

Les contraintes seront donc concentrées dans la partie centrale des DEPT. Les ailes auront comme rôle secondaire la transmission d'une faible partie du chargement du mur vers les faces supérieures des DEPT inférieurs. Les angles concaves seront donc très peu sollicités

Pour assurer une telle transmission de charges et éviter la fissuration dans les angles concaves, il suffit alors de légèrement modifier les dimensions de fabrication des éléments. En diminuant légèrement la valeur de la hauteur  $h_1$  de la partie supérieure tout en augmentant de la même valeur la hauteur  $h_2$  de la partie inférieure, on garantit le contact entre la face (a) du DEPT supérieur et la face (b) du DEPT inférieur (Figure 280).

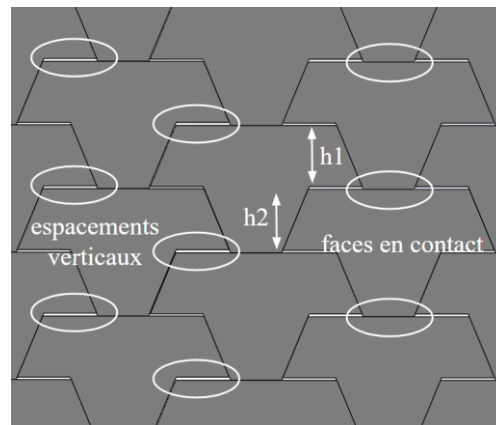


Figure 280 - Modification des hauteurs 1 et 2 du DEPT

Les faces en contact assureront la transmission des charges au contraire des faces espacées verticalement.

La valeur de la modification de ces hauteurs doit être suffisamment élevée pour assurer la transmission verticale des charges mais suffisamment faible pour éviter l'apparition de jours rendant le mur perméable. La mise en place de mortier-colle, décrit en section 1.4.3.3, pourrait permettre de remplir ces espacements et ainsi rendre le mur totalement imperméable.

### 5.4.2. Essai de basculement

A titre illustratif, un essai de poussée horizontale sur un DEPT d'essai (DC35) a été effectué. Une force est appliquée par un vérin en tête de l'élément, sur une de ses faces latérales (Figures 281). L'élément est posé sur une planche en bois retenue horizontalement, l'empêchant de glisser.



Figures 281 - Essai de basculement latéral sur un DEPT simple

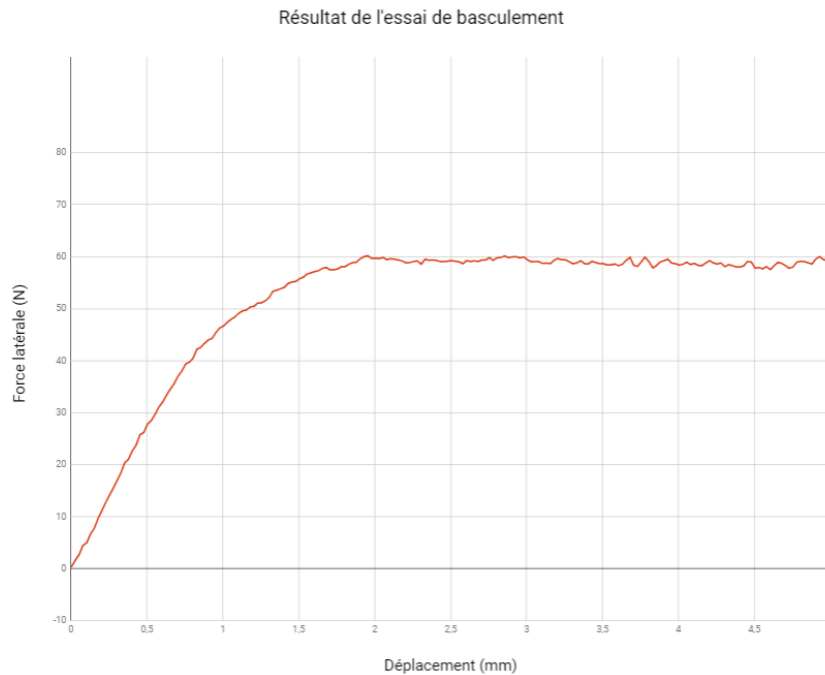


Figure 282 - Résultat de l'essai de basculement

Cet essai permet de déterminer la force nécessaire à faire basculer un DEPT dans la direction latérale. La force obtenue en début de basculement vaut environ 59kN (Figure 282). Notons qu'un calcul de stabilité dans cette direction est disponible en Annexe A.3.1, où il a été calculé que la force nécessaire au basculement de l'élément était de 41,386N pour un DEPT de 13,5kg. Pour le DC35 pesant 13,15kg, celle-ci est estimée à 40,313N.



# Conclusion





## Objectif et rétrospective des recherches

L'étude et le développement d'un système constructif drone-compatible, menés par Pierre Latteur et Sébastien Goessens depuis 2015, ont montré l'importance fondamentale d'imaginer des éléments de maçonnerie compatibles avec un tel système nouveau, c'est-à-dire pouvant être assemblés par des drones. De nombreux critères doivent être respectés pour être considérés comme tels: reprise d'imprécisions de localisation du drone lors de la pose, poids réduit, assemblage par gravité ou encore résistance. D'autres donnent à chacune des typologies développées lors des dernières années des avantages par rapport aux autres, comme par exemple l'ergonomie, la ressemblance aux éléments de maçonnerie traditionnelle, le coût de fabrication, etc.

La balance entre l'importance de ses critères change au fur et à mesure de l'avancée dans les recherches. Alors qu'un grand nombre de typologies d'éléments permettent de respecter les impératifs de construction et d'utilisation premièrement cités, les autres critères considérés initialement comme "secondaires" prennent une place de plus en plus centrale dans le processus d'imagination, d'étude et de développement d'éléments de maçonnerie drone-compatibles.

La simplicité de la forme des éléments s'est invitée dans la catégorie des avantages importants, puisqu'elle facilite leur fabrication et par conséquent leur coût. L'objectif de ce travail était alors de développer une nouvelle typologie d'éléments alliant drone-compatibilité et simplicité de forme, en opposition aux typologies développées ces dernières années à l'UCL.

La technologie composée des DEPT (Drick Extrudable Progressive Triangular) et de ses GGS associés (Gripping and Guiding System) a été imaginée sur base de l'idée du transfert partiel de la complexité de la forme du bloc vers le système faisant le lien entre drone et l'élément saisi. Celle-ci couple des éléments de maçonnerie de forme capables de corriger l'imprécision de pose dans la direction parallèle au mur construit et un système liant drone et élément jouant le rôle de correction de l'imprécision de pose dans la direction perpendiculaire. Une idée qui bouleverse la réflexion et révolutionne en quelque sorte la manière d'appréhender le problème posé.

Dans la théorie, le DEPT remplit complètement le cahier des charges de l'élément drone-compatible, et des essais grandeur nature en laboratoire ont permis de le valider expérimentalement. De plus, le DEPT se différencie des autres typologies précédemment développées par sa forme très simple, extrudable et donc peu coûteuse à produire en masse. Les avantages fonctionnel et économique qui en découlent sont conséquents.

Ce transfert de la complexité oblige ensuite le développement d'un système de préhension du DEPT par le drone plus complexe. La réalisation de trois possibilités de GGS (Guiding and Gripping System) testées en laboratoire a démontré que le couplage du DEPT avec ces GGS était réalisable en laboratoire. Et tout porte à croire que son utilisation en extérieur associée à un système de localisation et de guidage du drone efficace sera à l'avenir possible.

D'autres recherches permettent d'ajouter des avantages au système combiné DEPT/GGS associé :

- la polyvalence dimensionnelle du DEPT, dont toutes les dimensions sont modifiables et adaptables à un projet spécifique ; une infinité de DEPT de proportions et de caractéristiques différentes peut ainsi être développée sans mettre en danger l'efficacité du système ;
- la possibilité d'assembler des structures de type maisons unifamiliales (murs droits, coins, jonctions de mur, ouvertures, etc) en utilisant le DEPT et les DEPT dérivés ; ceux-ci conservent par ailleurs le caractère simple de la forme du DEPT, et notamment son extrudabilité ;
- la suppression des nombreux inconvénients apparaissant lors de l'assemblage de dricks imaginés ultérieurement ;

- les bonnes caractéristiques mécaniques de sa forme et du matériau constitutif (béton avec de l'Argex concassé), possédant un poids volumique d'environ 1500kg/m<sup>3</sup> (contre 2500kg/m<sup>3</sup> pour un béton classique);
- les améliorations possibles qui pourraient à l'avenir augmenter son efficacité et sa compétitivité : réduction du poids, utilisation de mortier-colle, développement d'autres systèmes de reprise des imprécisions de pose, etc.

Cela dit, cette technologie est encore loin d'être applicable en conditions réelles et nécessite encore de nombreuses améliorations, surtout des GGS.

### **Enseignements tirés des essais et améliorations possibles**

Les essais d'assemblage de murs en DEPT avec un drone ou manuellement en laboratoire se sont montrés riches en enseignements.

Le premier concerne les DEPT eux-mêmes et plus particulièrement l'importance de leur précision dimensionnelle de fabrication. Les éléments sont mis en place par « auto-assemblage » en glissant les uns sur les autres, alors que l'usage de mortier traditionnel, permettant la correction des imprécisions dimensionnelles, est difficile dans le système constructif étudié. La réalisation d'assemblages précis et sans décalage de positionnement des éléments imposent l'utilisation d'éléments sans défaut de fabrication. La production en masse de DEPT, de forme simple, en respectant ce critère de précision dimensionnelle, semble envisageable. Des études complémentaires et la concertation avec des acteurs extérieurs du secteur de la fabrication d'éléments de maçonnerie doivent à l'avenir confirmer cette hypothèse.

Certaines lacunes réalisationnelles des GGS, décelées lors des essais avec drone, ont montré la difficulté d'obtenir des systèmes suffisamment robustes et efficaces sans une réflexion plus profonde et des essais préalables. Les prototypes réalisés en laboratoire sont les premiers imaginés et doivent encore être améliorés pour gommer ces lacunes et arriver à des systèmes utilisables en extérieur et à plus grande échelle.

Le GGS-G (G pour « Grabber »), couplant le système de préhension par pince auto-serrante et le système de reprise d'imprécision latérale de pose par guides latéraux, apparaît malgré tout comme le système le plus prometteur. Il se démarque par sa capacité à être utilisé sur des éléments ne nécessitant pas de modification ni d'adaptation, lui donnant un sérieux avantage sur le plan économique. Les études futures ont un réel intérêt à considérer ce système comme celui à développer en priorité et à en extraire le potentiel. Des modifications des matériaux utilisés, de ses dimensions et de son mécanisme sont nécessaires afin d'obtenir un GGS parfaitement adapté.

L'utilisation du mortier-colle, brièvement décrit, devra également être étudiée avec plus de considération. Ses avantages sont nombreux et sa complémentarité théorique avec le système développé doit encore être prouvée. Mais tout porte à croire que le mortier-colle participera à améliorer le système DEPT/GGS associé et la qualité des assemblages d'éléments de type DEPT ou de tout autre typologie.

### **Etudes futures et pistes de réflexion**

La technologie DEPT/GGS associé telle que développée dans ce travail est prometteuse et présente de nombreux avantages. Cependant, de nouvelles pistes de réflexion se sont présentées en cours de recherches. Ces pistes et leur développement pourraient alors concurrencer le système imaginé.

Tout d'abord, le DEPT possède un autre avantage qui n'a pas encore été abordé. Son assemblage à l'envers, face supérieure vers le bas, est possible. Les caractéristiques drone-compatibles et la plupart des points forts du DEPT sont conservées: reprise des imprécisions de pose, forme simple et fabrication

bon marché, assemblage progressif, variabilités des dimensions et proportions, etc. Une étude de cette utilisation du DEPT pourrait alors dévoiler des caractéristiques qui lui donnerait un avantage sur l'utilisation étudiée ici du DEPT. Par exemple, l'élément à l'envers est plus stable en stockage et en transport, mais son assemblage nécessite une modification du GGS utilisé.

Ensuite, le raisonnement suivi dans l'élaboration du système DEPT/GGS associé s'est d'abord préoccupé du développement de l'élément de maçonnerie lui-même. Des GGS correspondants ont alors été imaginés par la suite pour s'adapter à la forme conçue. Le raisonnement inverse pourrait être suivi en réfléchissant en amont au système de préhension et de guidage le plus efficace avant d'en tirer des formes d'éléments complémentaires.

Enfin, il serait intéressant de se pencher sur un transfert total de la complexité, c'est-à-dire que le GGS devra corriger les imprécisions de pose du drone dans les directions perpendiculaire et parallèle au mur. Le but étant l'assemblage d'éléments à la forme proche de celle des éléments de maçonnerie traditionnelle (à profil rectangulaire). Le système faisant le lien entre l'élément et le drone sera donc plus complexe puisqu'il devra placer lui-même l'élément parfaitement à son emplacement voulu. Une solution de « GCGS » (« Gripping and Complete Guiding System ») a déjà été imaginée mais d'autres peuvent être développées et testées à l'avenir. Les avantages d'un tel système pourraient, si sa viabilité est prouvée, dépasser les avantages du système DEPT et GGS associé.

### **Le mot de la fin**

Cette thèse a permis la validation partielle d'un système alliant une forme simple (le DEPT) et des systèmes de préhension et de pose complexifiés (GGS). Elle a également élargi les champs de possibilités existantes pour satisfaire à la question du développement d'éléments de maçonnerie utilisables dans un système constructif drone-compatible. De nouvelles pistes sont encore à explorer pour, et on le souhaite, pouvoir envisager à terme la construction de bâtiments avec cette nouvelle technologie prometteuse.



# Bibliographie

1. **Jean-Sébastien Breton, Justin Leplat.** *Feasibility study for drone-based manufacturing of architectural structures.* Louvain-la-Neuve : UCL, 2015.
2. **Reniers, M.** *Development of elementary BIM tools for drone-compatible construction systems.* Louvain-la-Neuve : UCL, 2016.
3. **J.-F. Leboutte, V. Parisel.** *Développement d'un système constructif "drone-compatible" pour la construction de maisons unifamiliales en maçonnerie et béton.* Louvain-la-Neuve : UCL, 2017.
4. **A. Naveau, A. Moncourrier.** *Development of a "drone-compatible" masonry construction system.* Louvain-la-Neuve : UCL, 2016.
5. **P. Latteur, S. Goessens, C. Mueller.** *Feasibility study for drone-based masonry construction of real-scale structures.* Louvain-la-Neuve et Boston : UCL et MIT, 2017.
6. **Weinerberg Belgique.** [En ligne] <https://www.wienerberger.be/fr>.
7. **Interblocs SA.** [En ligne] <http://www.interblocs.com/fr>.
8. **Béton de la Lomme SA.** [En ligne] <http://www.betondelalomme.be/cms/index/index/page/blocs-fraises-coller/lang/fr>.
9. **www.wikipedia.org.** [En ligne] [https://en.wikipedia.org/wiki/Polylactic\\_acid](https://en.wikipedia.org/wiki/Polylactic_acid).
10. **Gibson, C. Coppieters.** *Environmental and financial feasibility of a drone-built architectural.* Louvain-la-Neuve : UCL, 2016.
11. **P. Latteur, S. Goessens, C. Mueller, M. Reniers, M. Zhao.** *Masonry construction with drones.* Tokyo : IASS Annual Symposium 2016 Spatial Structures in the 21st Century, 2016.
12. **Bruneau, A.-S. Branders A.** *Etude de faisabilité de l'intégration des constructions drone.* Louvain-la-Neuve : UCL, 2017.



# Annexes



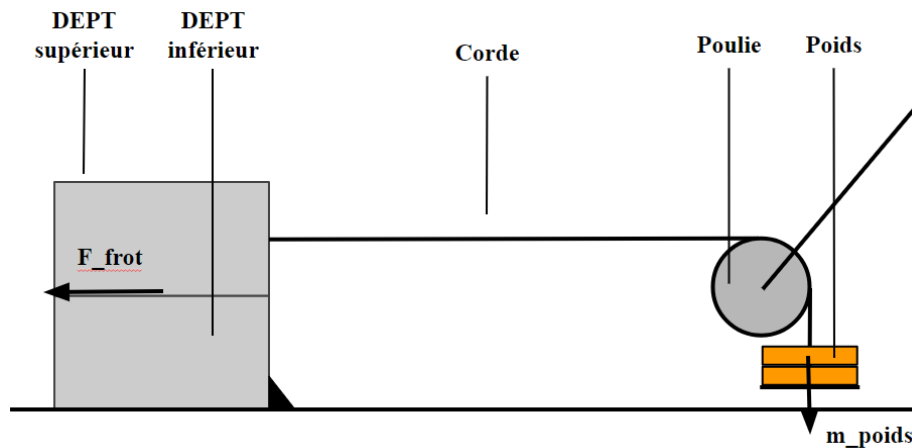


## A.1. Essai de coefficient de frottement

### Objectifs de l'essai

Mesurer le coefficient de frottement statique entre deux faces d'éléments coulés avec la composition de béton utilisé en test et en déduire l'angle de glissement

### Schéma



### Photo



### Hypothèse

Frottement uniforme sur toute la surface de contact entre les DEPT et frottement inexistant dans la poulie

### Procédure

- des crochets sont vissés dans la demi hauteur de la face supérieure des DEPT d'essai
- le DEPT supérieur est placé sur le DEPT inférieur, en contact sur 100% de la face latérale
- la corde est fixée au crochet, passée dans la poulie et lui est fixée à une plateforme en bois à l'autre extrémité
- la plateforme en bois est chargée en poids de 0,5kg à 5kg jusqu'à atteindre la force de frottement statique entre les deux DEPT
- les DC01 et DC02 serviront d'éléments supérieurs et les DC03 à DC06 d'éléments inférieurs

## Résultats

| DEPT d’essai    | Force de frottement statique (kN) | Moyenne (kg) |
|-----------------|-----------------------------------|--------------|
| DC01 (12,250kg) |                                   |              |
| DC03            | 7,400                             | 7,700        |
| DC04            | 7,800                             |              |
| DC05            | 8,000                             |              |
| DC06            | 7,600                             |              |
| DC02 (11,500kg) |                                   |              |
| DC03            | 6,900                             | 7,025        |
| DC04            | 7,200                             |              |
| DC05            | 7,400                             |              |
| DC06            | 6,600                             |              |

$$\mu_{DC01} = \frac{7,700}{12,250} = 0,63 \Rightarrow \alpha_{f,DC01} = \arctan(0,63) = 32,2^\circ$$

$$\mu_{DC02} = \frac{7,025}{11,500} = 0,61 \Rightarrow \alpha_{f,DC02} = \arctan(0,61) = 31,4^\circ$$

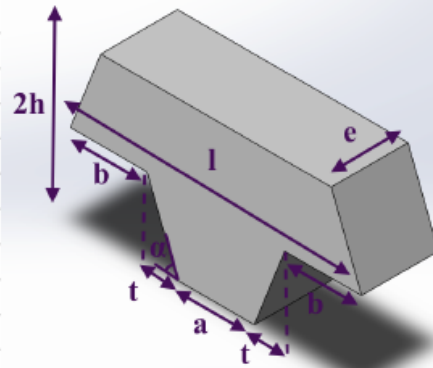
## Conclusion

- le coefficient de frottement obtenu se situe entre 0,60 et 0,65, soit des valeurs similaires à celles disponibles dans la littérature pour des bétons lisses
- l'angle de glissement qui en découle vaut environ 30°
- à noter que les éléments testés possèdent une qualité de surface très bonne, contrairement aux éléments coulés par après ; il convient alors à établir le coefficient de glissement des DEPT d'essai de 0,75 et donc un angle de glissement entre 35 et 40°

## A.2. Détermination et choix des dimensions optimales du DEPT

### A.2.1. Feuille 1 : Données et détermination des dimensions optimales

| DONNEES                             |       |                   |
|-------------------------------------|-------|-------------------|
| Drones & système de guidage         |       |                   |
| Charge utile P_max                  | 13,5  | kg                |
| Tolérance t                         | 0,05  | m                 |
| Matériau du bloc                    |       |                   |
| Angle de glissement alpha           | 45    | °                 |
| Poids volumique béton gamma         | 1500  | kg/m <sup>3</sup> |
| Rééduction du poids beta            | 100%  |                   |
| Imprécisions GGS                    |       |                   |
| Imprécision latérale max y          | 0,001 | m                 |
| Imprécisions angle latéral moy      | 0,5   | degré             |
| Exigences utilisateur               |       |                   |
| Imprécision latérale totale tolérée | 0,02  | m                 |
| Epaisseur e                         | 0,15  | m                 |
| Hauteur d'étage                     | 3     | m                 |



| CALCUL                                                |       |                |                                      |
|-------------------------------------------------------|-------|----------------|--------------------------------------|
| Calcul de l'aire A                                    |       |                |                                      |
| $A = P_{\text{max}} / (\gamma \cdot e \cdot \beta) =$ | 0,06  | m <sup>2</sup> |                                      |
| Détermination de h                                    |       |                |                                      |
| $h_{\text{min, frot}} = t \cdot \tan(\alpha) =$       | 0,050 | m              | voir section 2.2.2.4.1.              |
| $h_{\text{min, implat}} =$                            | 0,075 | m              | voir section 2.2.2.4.1.              |
| $h_{\text{min, impang}} =$                            | 0,083 | m              | voir section 2.2.2.4.1. et feuille 2 |
| $h_{\text{min}} = \max[h_{\text{min}, x}] =$          | 0,083 | m              |                                      |
| $h_{\text{max}} =$                                    | 0,2   | m              | voir section 2.2.2.4.2.              |
| $h_{\text{choisi}} =$                                 | 0,12  | m              | voir section 2.2.2.4.3.              |
| Calcul de la somme (a+l)                              |       |                |                                      |
| $(a+l) = A/h =$                                       | 0,5   | m              |                                      |
| Détermination de a                                    |       |                |                                      |
| $a_{\text{min}} =$                                    | 0,1   | m              | voir section 2.2.2.5.                |
| $a_{\text{max}} =$                                    | 0,2   | m              | voir section 2.2.2.5.                |
| $a_{\text{opt}} =$                                    | 0,05  | m              | voir section 2.2.2.5.                |
| $a_{\text{choisi}} =$                                 | 0,05  | m              |                                      |
| Calcul de l et b                                      |       |                |                                      |
| $l = (a+l) - a =$                                     | 0,45  | m              | voir section 2.2.2.6.                |
| $b = (l - a - 2t)/2 =$                                | 0,15  | m              | voir section 2.2.2.7.                |

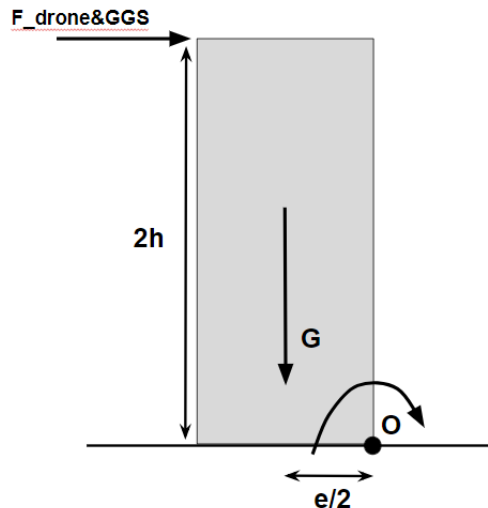
### A.2.2. Feuille 2 : Calcul de $h_{min,imp\_ang}$

| nbres blocs | h     | delta/2h | delta_tot/2h | delta_tot |
|-------------|-------|----------|--------------|-----------|
| 1           | 1,500 | 0,008727 | 0,0087       | 0,02618   |
| 2           | 0,750 | 0,017455 | 0,0262       | 0,03927   |
| 3           | 0,500 | 0,026186 | 0,0524       | 0,05237   |
| 4           | 0,375 | 0,034921 | 0,0873       | 0,06547   |
| 5           | 0,300 | 0,043661 | 0,1310       | 0,07857   |
| 6           | 0,250 | 0,052408 | 0,1834       | 0,09168   |
| 7           | 0,214 | 0,061163 | 0,2445       | 0,10480   |
| 8           | 0,188 | 0,069927 | 0,2533       | 0,09498   |
| 9           | 0,167 | 0,078702 | 0,3320       | 0,11066   |
| 10          | 0,150 | 0,087489 | 0,4195       | 0,12584   |
| 11          | 0,136 | 0,096289 | 0,5158       | 0,14066   |
| 12          | 0,125 | 0,105105 | 0,6209       | 0,15522   |
| 13          | 0,115 | 0,113936 | 0,6297       | 0,14532   |
| 14          | 0,107 | 0,122785 | 0,7525       | 0,16125   |
| 15          | 0,100 | 0,131653 | 0,8841       | 0,17683   |
| 16          | 0,094 | 0,140541 | 1,0247       | 0,19213   |
| 17          | 0,088 | 0,149451 | 1,0336       | 0,18240   |
| 18          | 0,083 | 0,158385 | 1,1920       | 0,19866   |
| 19          | 0,079 | 0,167343 | 1,3593       | 0,21463   |
| 20          | 0,075 | 0,176327 | 1,5356       | 0,23035   |
| 21          | 0,071 | 0,185339 | 1,7210       | 0,24586   |
| 22          | 0,068 | 0,194381 | 1,9154       | 0,26119   |
| 23          | 0,065 | 0,203453 | 2,1188       | 0,27637   |
| 24          | 0,063 | 0,212557 | 2,3314       | 0,29142   |
| 25          | 0,060 | 0,221695 | 2,5531       | 0,30637   |
| 26          | 0,058 | 0,230868 | 2,7839       | 0,32122   |
| 27          | 0,056 | 0,240079 | 3,0240       | 0,33600   |
| 28          | 0,054 | 0,249328 | 3,2733       | 0,35072   |
| 29          | 0,052 | 0,258618 | 3,5320       | 0,36538   |
| 30          | 0,050 | 0,267949 | 3,7999       | 0,37999   |
| 31          | 0,048 | 0,277325 | 4,0772       | 0,39457   |
| 32          | 0,047 | 0,286746 | 4,3640       | 0,40912   |
| 33          | 0,045 | 0,296214 | 4,6602       | 0,42365   |
| 34          | 0,044 | 0,305731 | 4,9659       | 0,43817   |
| 35          | 0,043 | 0,315299 | 5,2812       | 0,45268   |
| 36          | 0,042 | 0,324920 | 5,6061       | 0,46718   |
| 37          | 0,041 | 0,334596 | 5,9407       | 0,48168   |
| 38          | 0,039 | 0,344328 | 6,2851       | 0,49619   |
| 39          | 0,038 | 0,354119 | 6,6392       | 0,51071   |
| 40          | 0,038 | 0,363971 | 7,0032       | 0,52524   |
| 41          | 0,037 | 0,373885 | 7,3770       | 0,53978   |
| 42          | 0,036 | 0,383864 | 7,7609       | 0,55435   |
| 43          | 0,035 | 0,393911 | 8,1548       | 0,56894   |
| 44          | 0,034 | 0,404027 | 8,5588       | 0,58356   |
| 45          | 0,033 | 0,414214 | 8,9731       | 0,59820   |
| 46          | 0,033 | 0,424475 | 9,3975       | 0,61288   |
| 47          | 0,032 | 0,434813 | 9,8323       | 0,62760   |
| 48          | 0,031 | 0,445229 | 10,2776      | 0,64235   |
| 49          | 0,031 | 0,455727 | 10,7333      | 0,65714   |
| 50          | 0,030 | 0,466308 | 11,1996      | 0,67198   |

### A.3. Analyse de stabilité du DEPT

#### A.3.1. Stabilité latérale - détermination de $h_{max}$

Schéma



Calculs

Equilibre du moment en O:

$$F_{drone\&GGS} * 2h_{max} = G * e/2$$

avec e l'épaisseur du DEPT

G le poids du DEPT

$F_{drone\&GGS}$  la force maximale exercée par le drone et le GGS lors de la préhension

$h_{max}$  la demi hauteur maximale ou demi hauteur à laquelle l'instabilité du DEPT

Donc, on obtient l'expression de la hauteur maximale

$$h_{max} = \frac{G * e}{4 * F_{drone\&GGS}}$$

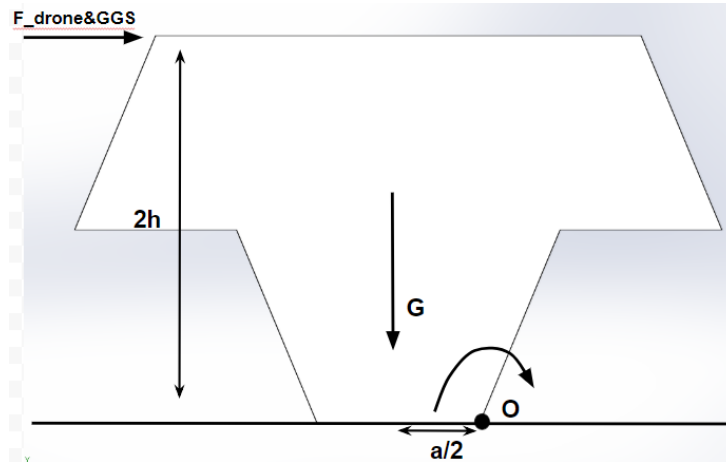
On peut également, de la même façon, déterminer la force induisant une instabilité pour un DEPT quelconque en fonction de ses dimensions et de son poids (exemple ci-dessous avec les dimensions du DEPT d'essais).

Excel

| STABILITE LATÉRALE - calcul de $h_{max}$ |        |                  | STABILITE LATÉRALE - calcul de $F_{instab}$ |         |                  |
|------------------------------------------|--------|------------------|---------------------------------------------|---------|------------------|
| <b>Données</b>                           |        |                  | <b>Données</b>                              |         |                  |
| P_DEPT =                                 | 65,000 | kg               | P_DEPT =                                    | 13,500  | kg               |
| g =                                      | 9,81   | m/s <sup>2</sup> | g =                                         | 9,81    | m/s <sup>2</sup> |
| G =                                      | 637,65 | N                | G =                                         | 132,435 | N                |
| e =                                      | 0,25   | m                | e =                                         | 0,15    | m                |
| $F_{drone\&GGS}$ =                       | 350,00 | N                | h =                                         | 0,12    | m                |
| <b>Calcul</b>                            |        |                  | <b>Calcul</b>                               |         |                  |
| $h_{max}$ =                              | 0,114  | m                | $F_{drone\&GGS}$ =                          | 41,386  | N                |

### A.3.2. Stabilité longitudinale - détermination de $a_{min}$ avec force en tête

#### Schéma



#### Calculs

Equilibre du moment en O:

$$F_{drone\&GGS} * 2h = G * a_{min}/2$$

avec h la demi hauteur du DEPT

G le poids du DEPT

$F_{drone\&GGS}$  la force maximale exercée par le drone et le GGS lors de la préhension

$a_{min}$  la longueur de base minimale ou longueur à laquelle apparaît l'instabilité du DEPT

On obtient alors

$$a_{min} = \frac{4h * F_{drone\&GGS}}{G}$$

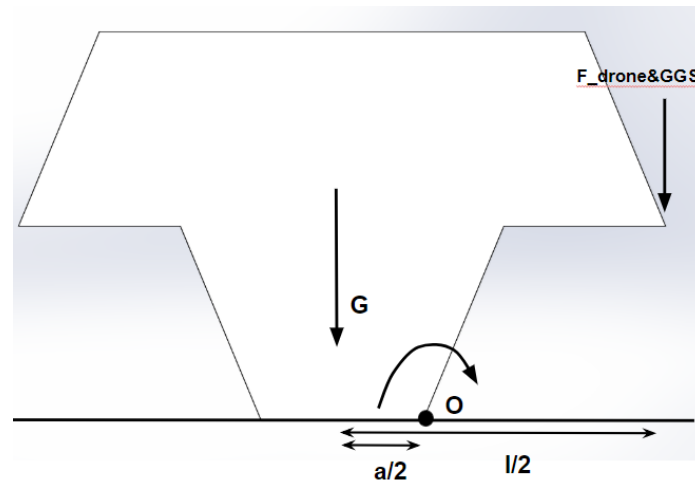
On peut également, de la même façon, déterminer la force induisant une instabilité pour un DEPT quelconque en fonction de ses dimensions et de son poids (exemple ci-dessous avec les dimensions du DEPT d'essais).

#### Excel

| STABILITE LATÉRALE (F en tête) - calcul de a_min |        |       | STABILITE LATÉRALE (F en tête) - calcul de F_instab |         |       |
|--------------------------------------------------|--------|-------|-----------------------------------------------------|---------|-------|
| <b>Données</b>                                   |        |       | <b>Données</b>                                      |         |       |
| P_DEPT =                                         | 65,000 | kg    | P_DEPT =                                            | 13,500  | kg    |
| g =                                              | 9,81   | m/s^2 | g =                                                 | 9,81    | m/s^2 |
| G =                                              | 637,65 | N     | G =                                                 | 132,435 | N     |
| h =                                              | 0,12   | m     | h =                                                 | 0,12    | m     |
| F_drone&GGS =                                    | 350,00 | N     | a =                                                 | 0,10    | m     |
| <b>Calcul</b>                                    |        |       | <b>Calcul</b>                                       |         |       |
| a_min                                            | 0,263  | m     | F_drone&GGS =                                       | 27,591  | N     |

### A.3.3. Stabilité longitudinale - détermination de $a_{min}$ avec force en aile

#### Schéma



#### Calculs

Equilibre du moment de O :

$$F_{\text{drone\&GGS}} * l/2 = G * a_{\text{min}}/2$$

avec  $l$  la longueur du DEPT

$G$  le poids du DEPT

$F_{\text{drone\&GGS}}$  la force maximale exercée par le drone et le GGS lors de la préhension

$a_{\text{min}}$  la longueur de base minimale ou longueur à laquelle apparaît l'instabilité du DEPT

On obtient alors

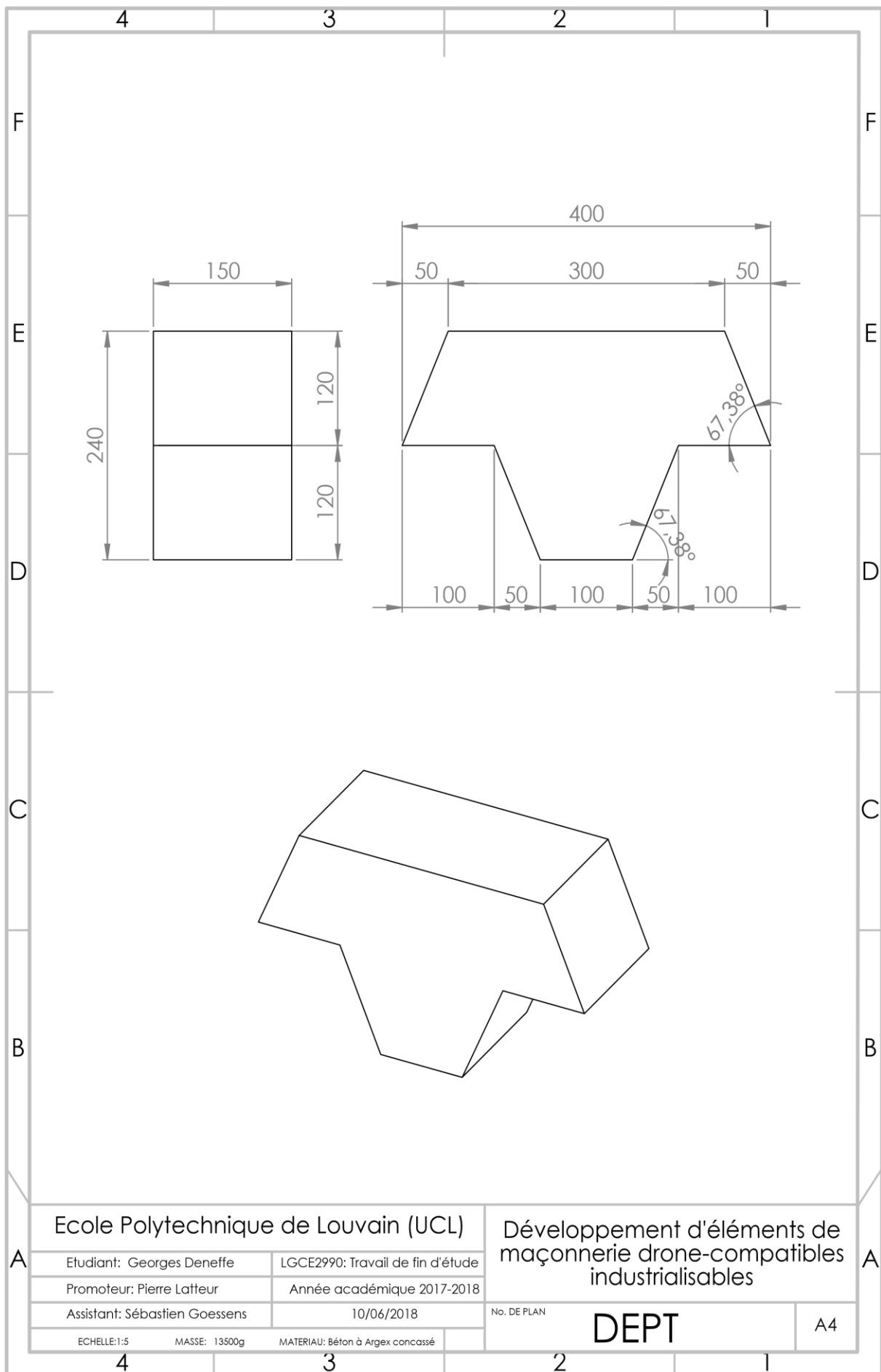
$$a_{\text{min}} = \frac{l * F_{\text{drone\&GGS}}}{G}$$

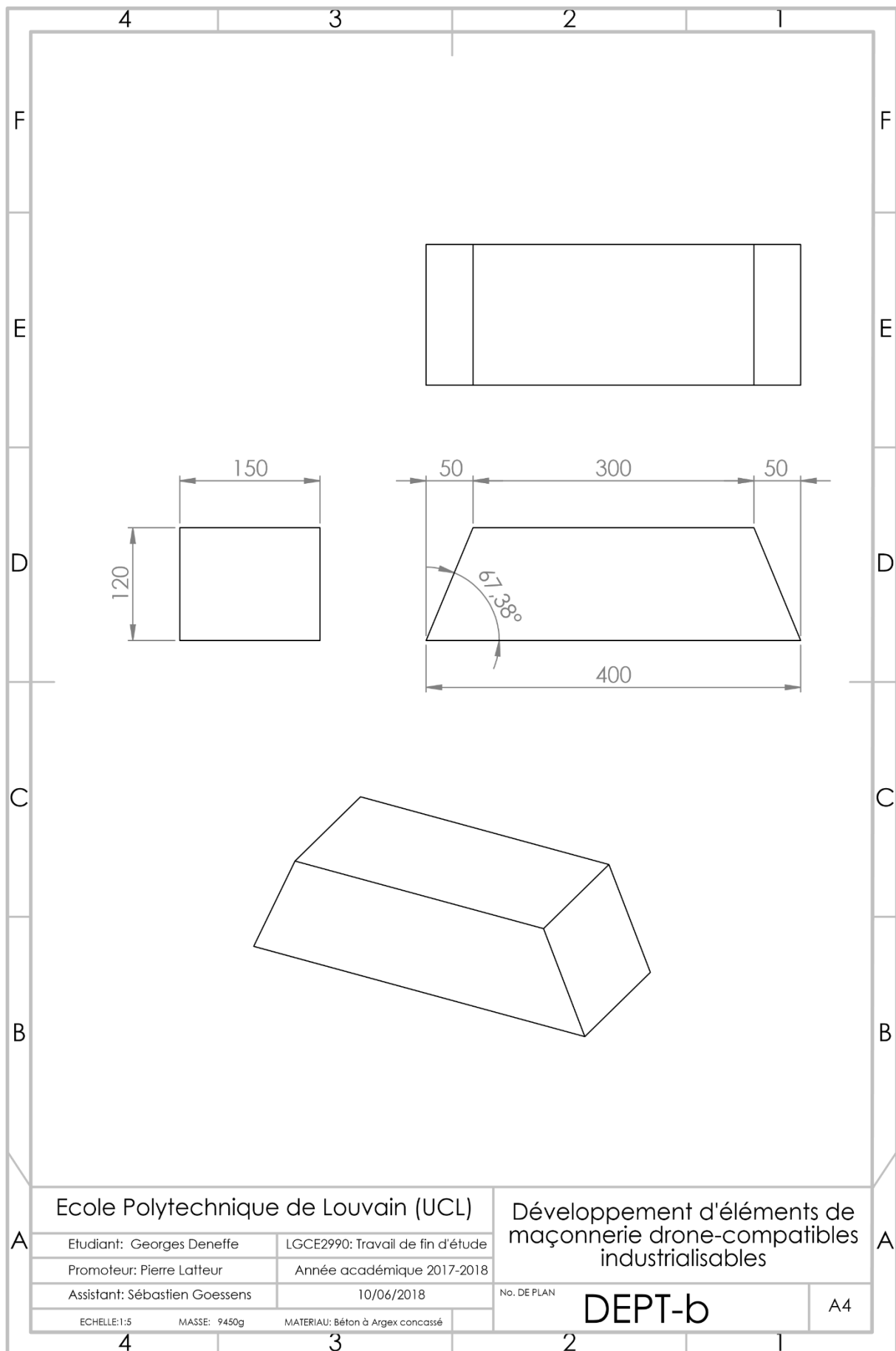
On peut également, de la même façon, déterminer la force induisant une instabilité pour un DEPT quelconque en fonction de ses dimensions et de son poids (exemple ci-dessous avec les dimensions du DEPT d'essais).

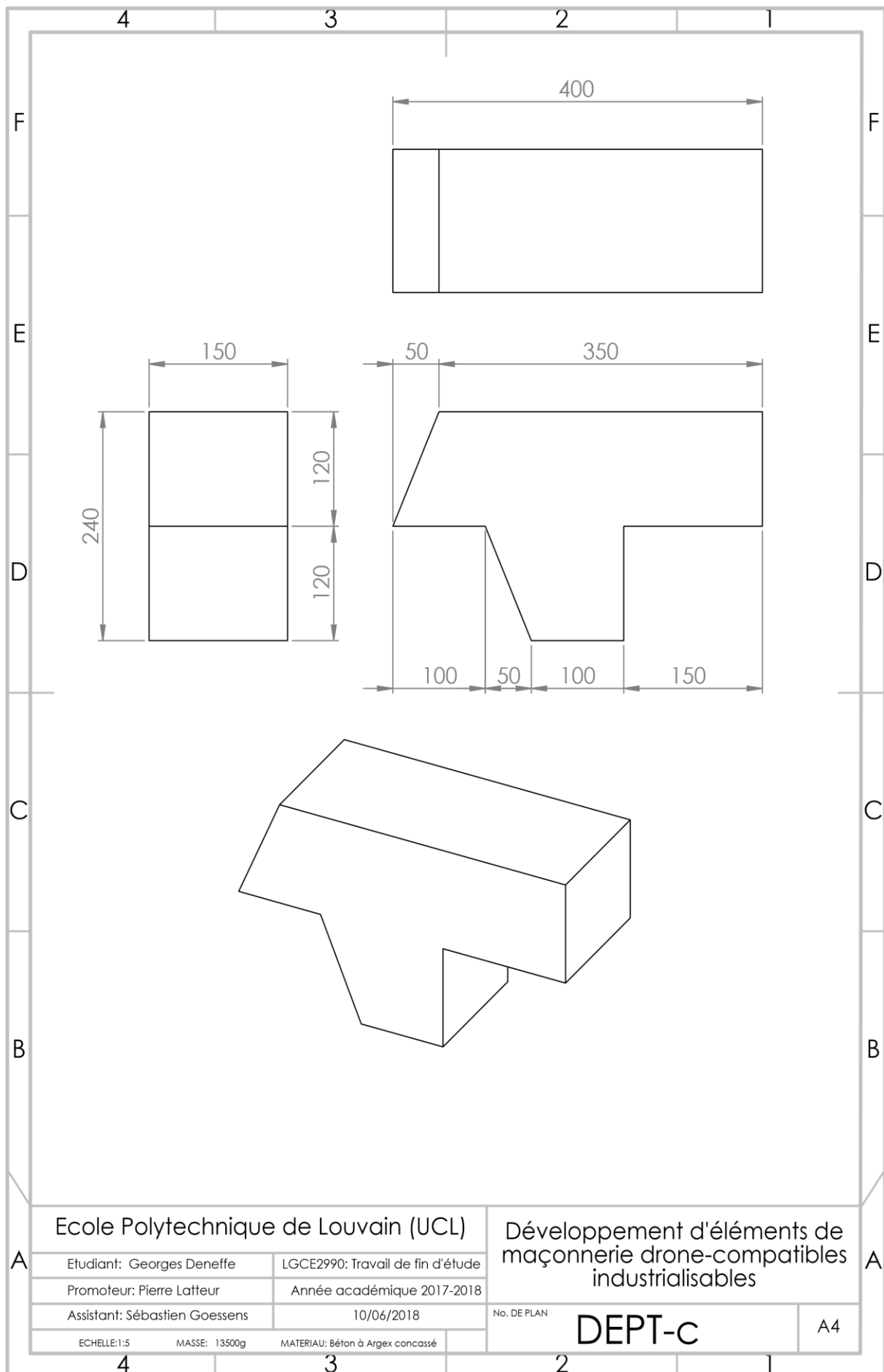
#### Excel

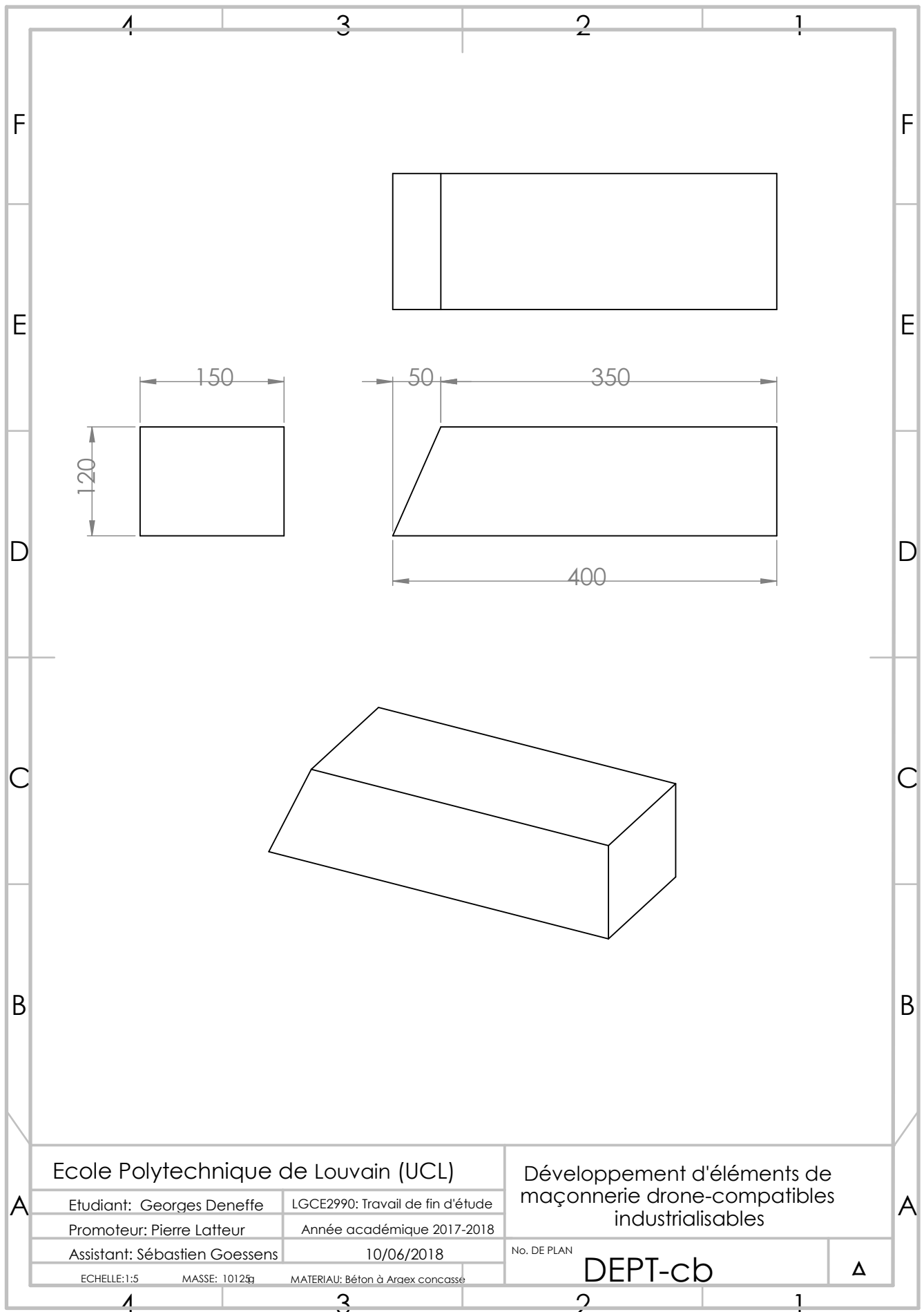
| STABILITE LATÉRALE (F en aile) - calcul de $a_{\text{min}}$ |        |                  | STABILITE LATÉRALE (F en aile) - calcul de $F_{\text{instab}}$ |         |                  |
|-------------------------------------------------------------|--------|------------------|----------------------------------------------------------------|---------|------------------|
| <b>Données</b>                                              |        |                  | <b>Données</b>                                                 |         |                  |
| P_DEPT =                                                    | 65,000 | kg               | P_DEPT =                                                       | 13,500  | kg               |
| g =                                                         | 9,81   | m/s <sup>2</sup> | g =                                                            | 9,81    | m/s <sup>2</sup> |
| G =                                                         | 637,65 | N                | G =                                                            | 132,435 | N                |
| l =                                                         | 0,8    | m                | l =                                                            | 0,40    | m                |
| F_drone&GGS =                                               | 350,00 | N                | a =                                                            | 0,10    | m                |
| <b>Calcul</b>                                               |        |                  | <b>Calcul</b>                                                  |         |                  |
| a_min                                                       | 0,439  | m                | F_drone&GGS =                                                  | 33,109  | N                |

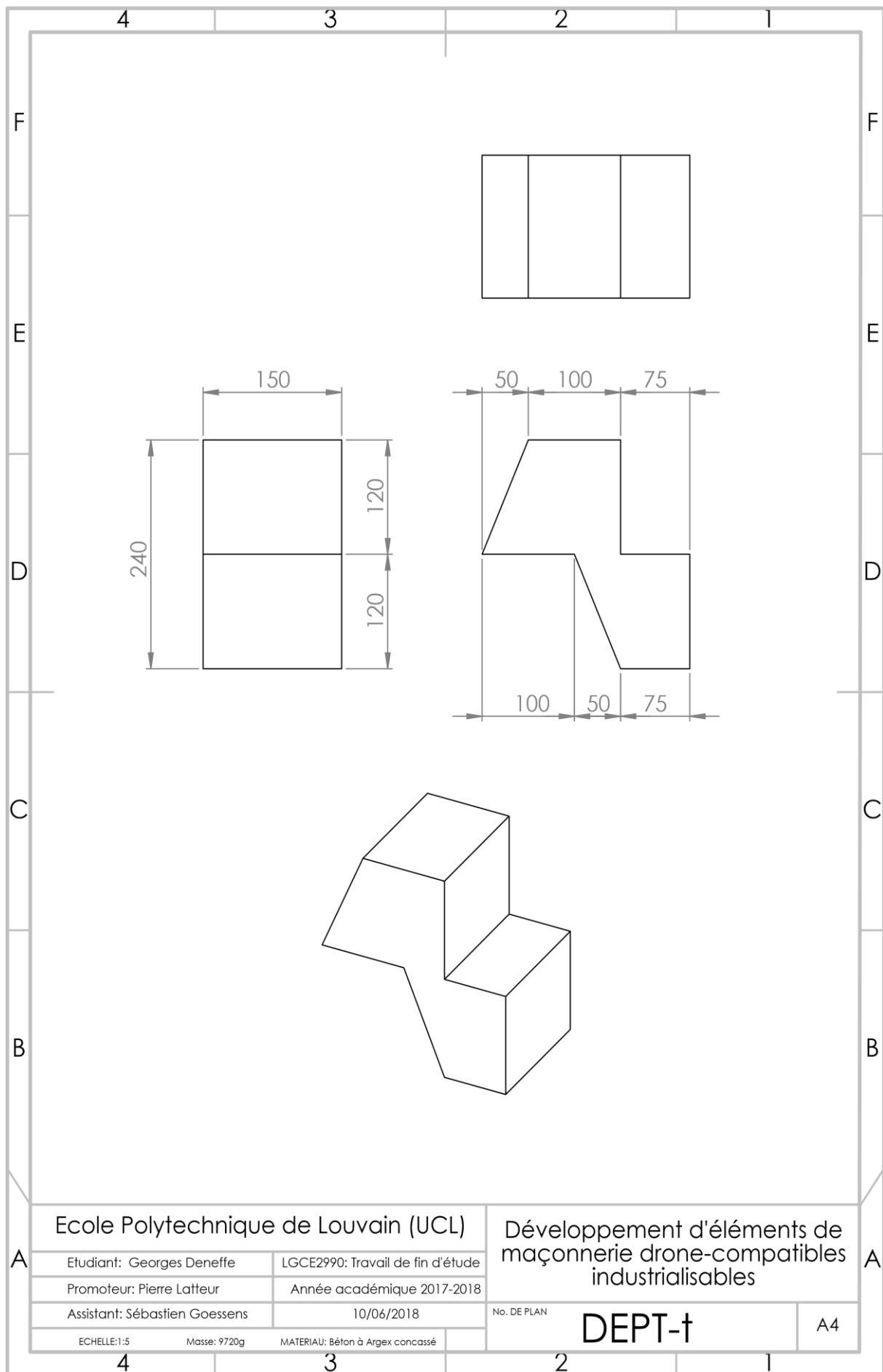
#### A.4. Plans du DEPT et ses dérivés









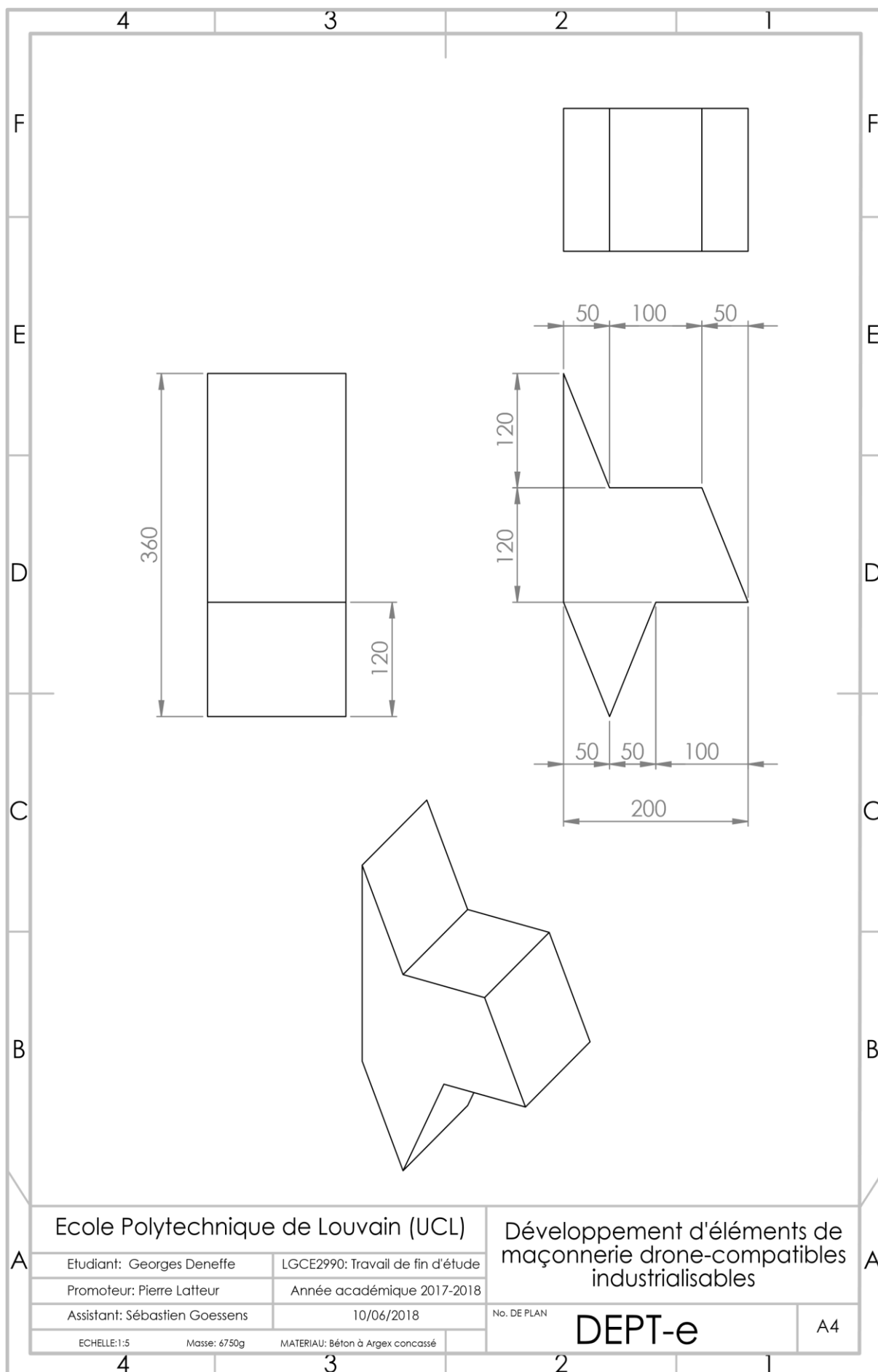


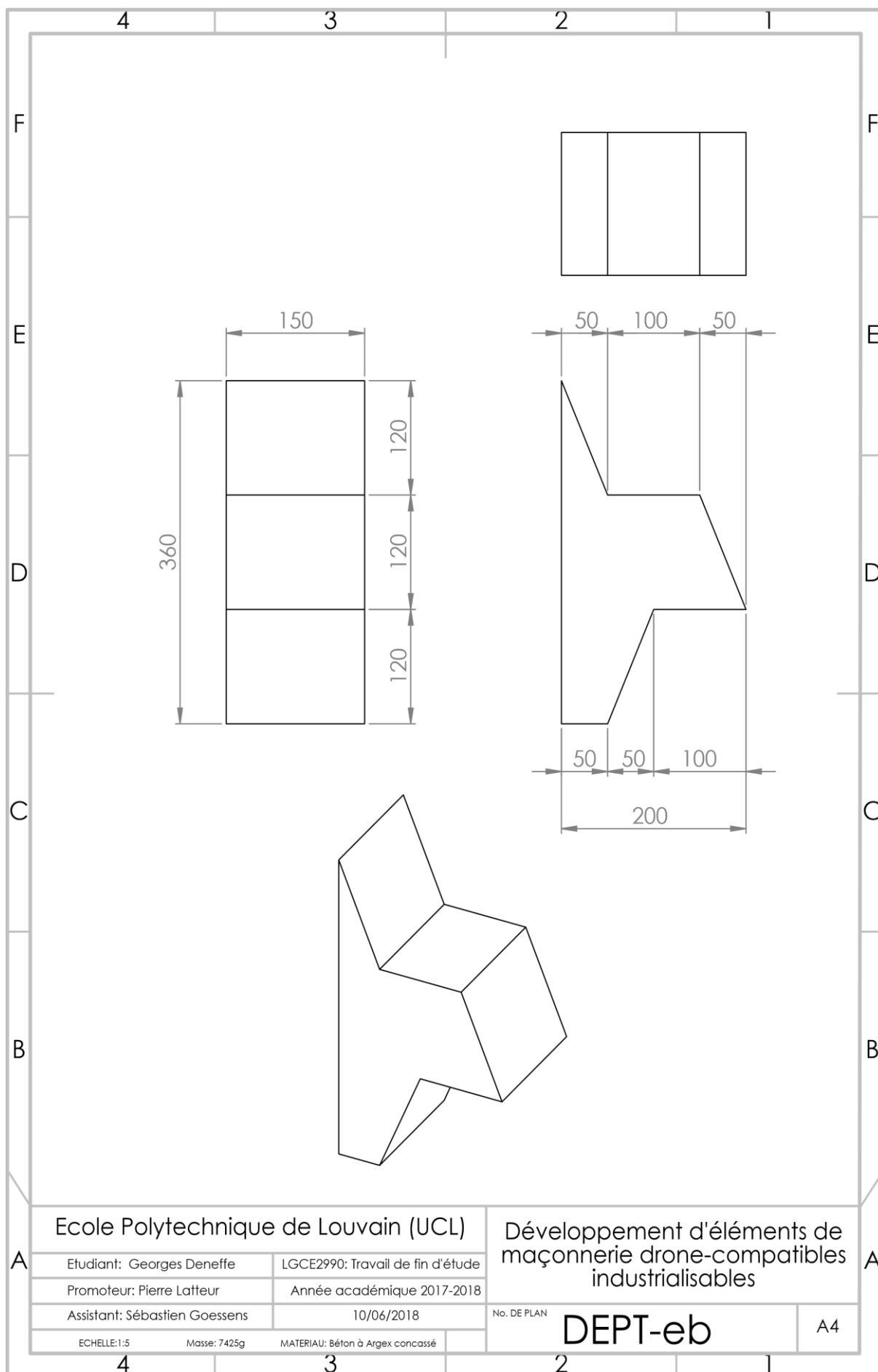
Développement d'éléments de  
maçonnerie drone-compatibles  
industrialisables

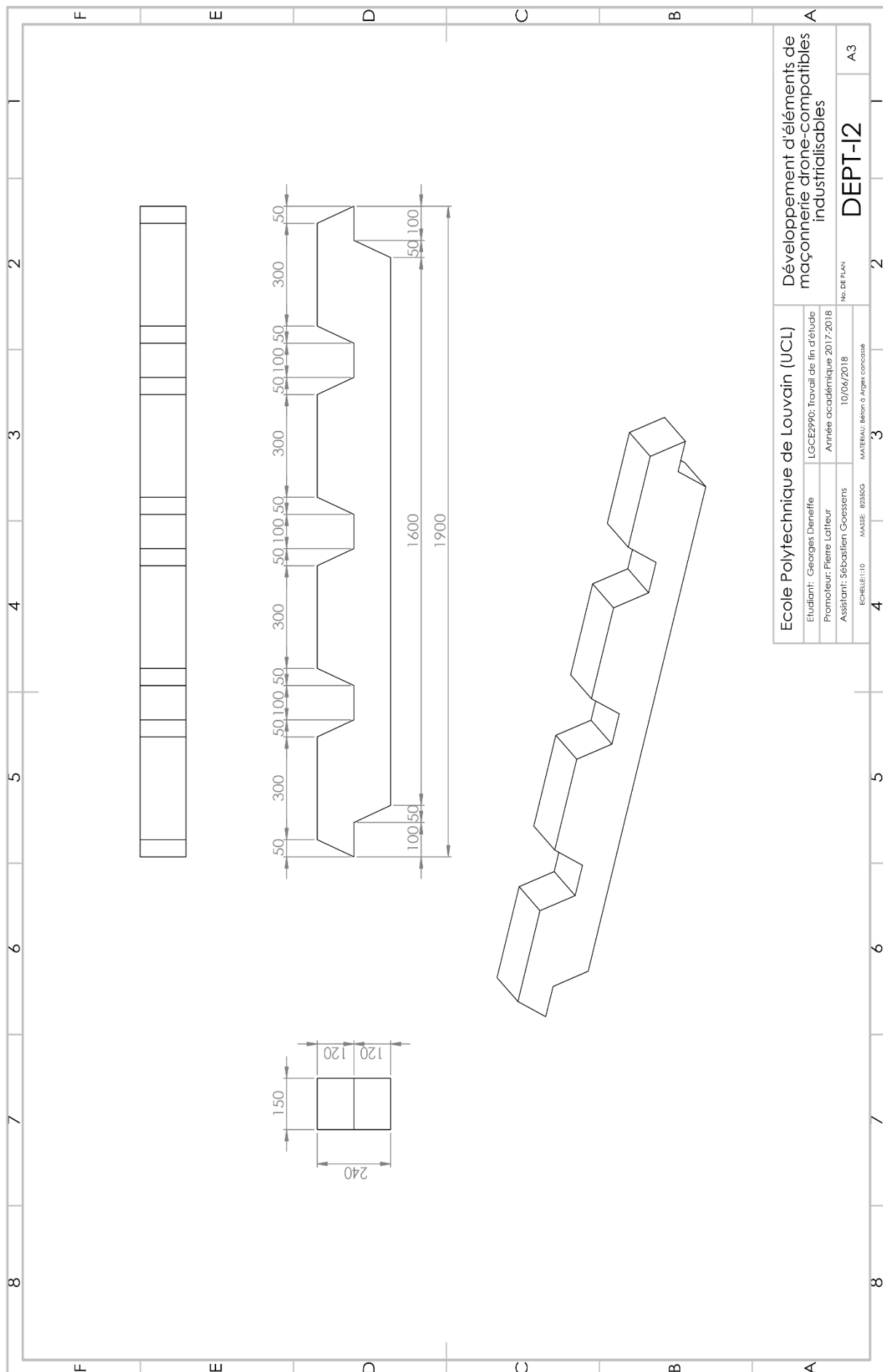
No. DE PLAN

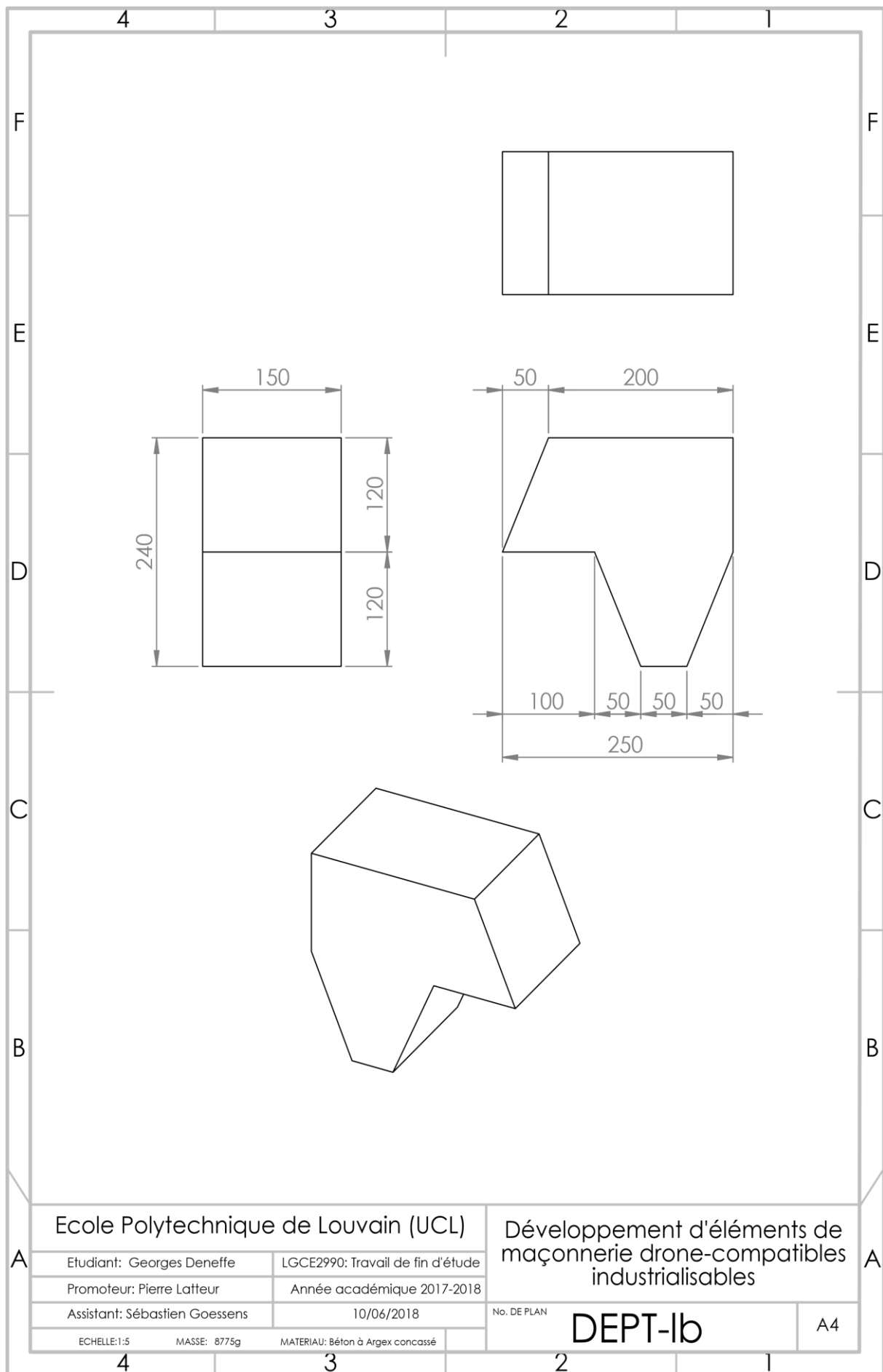
**DEPT-t**

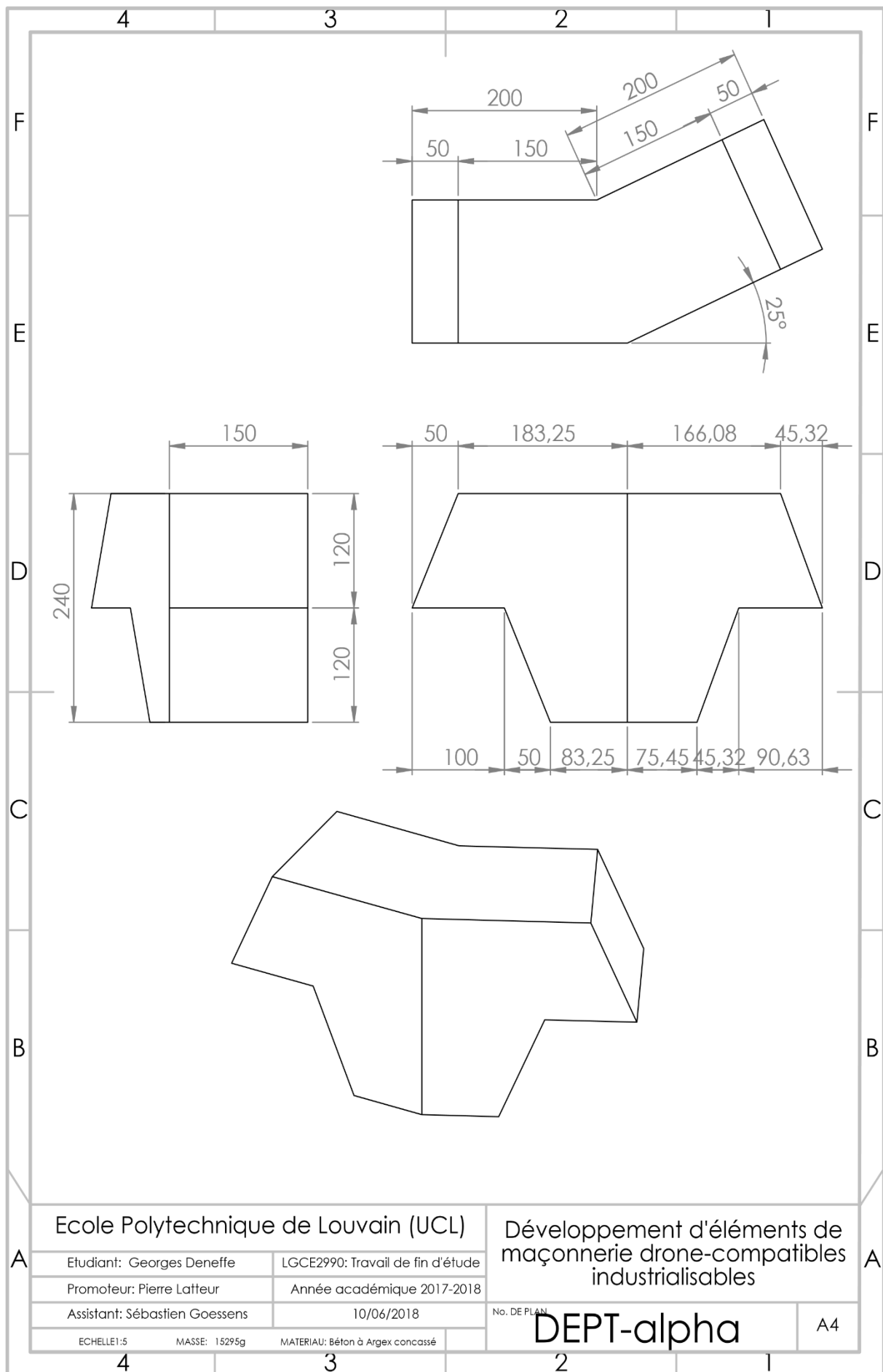
A4

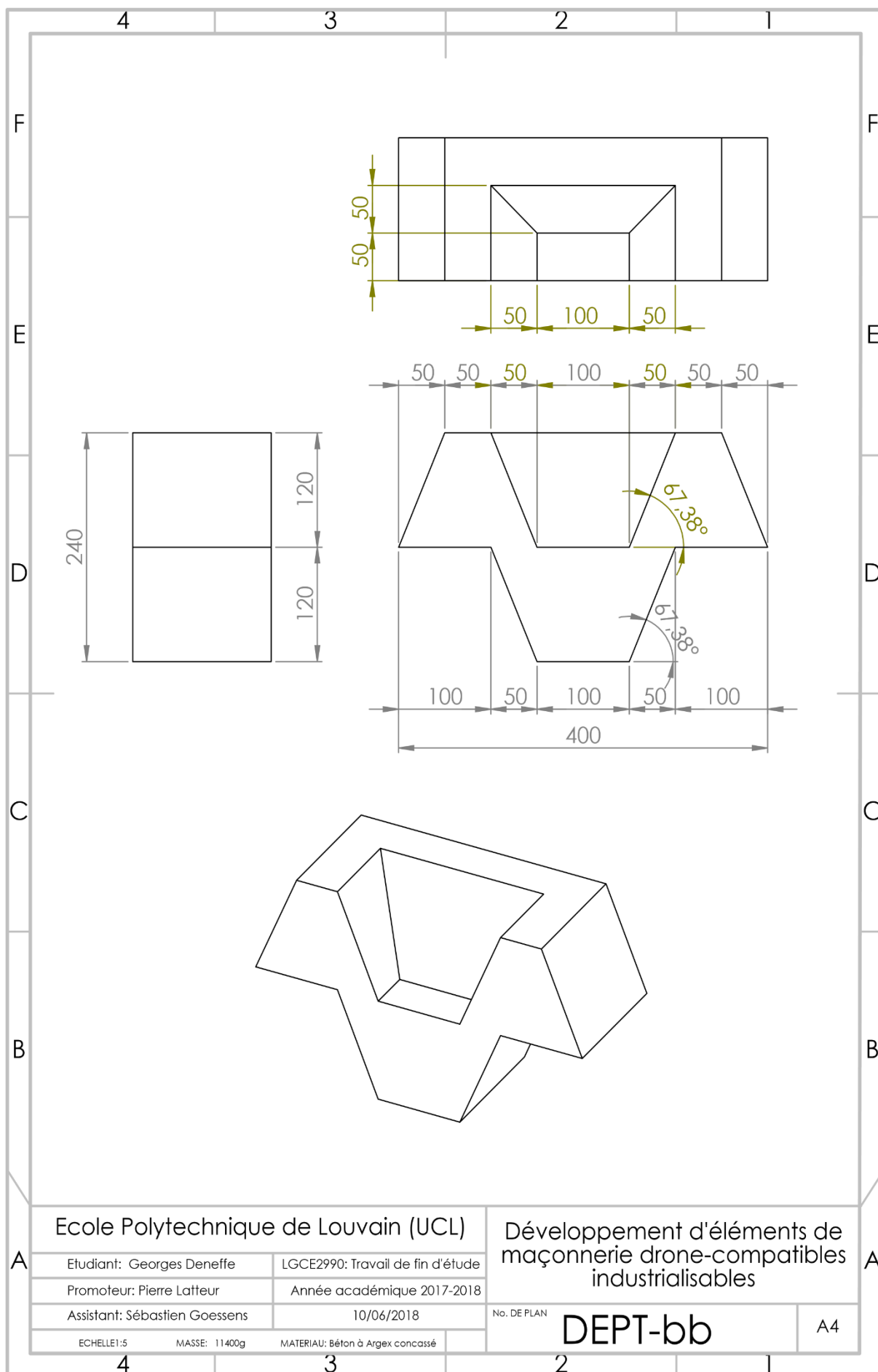


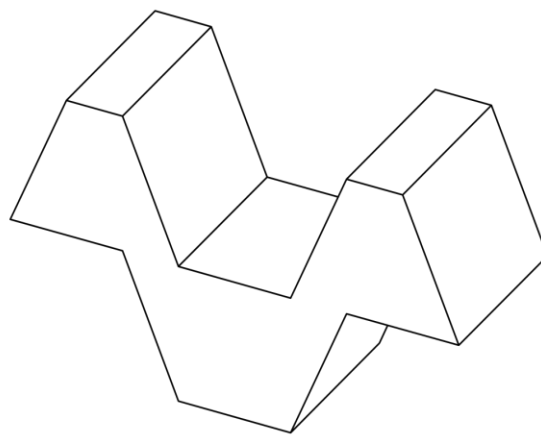
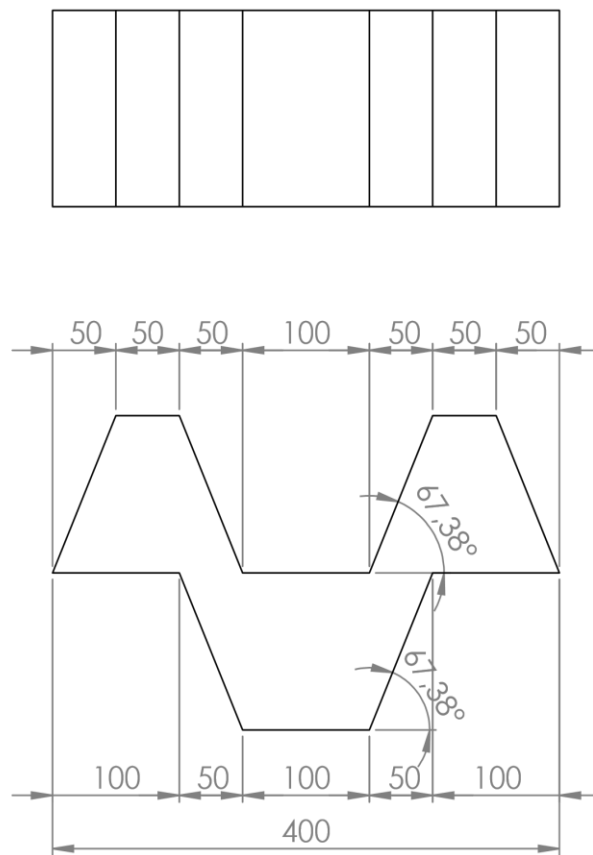
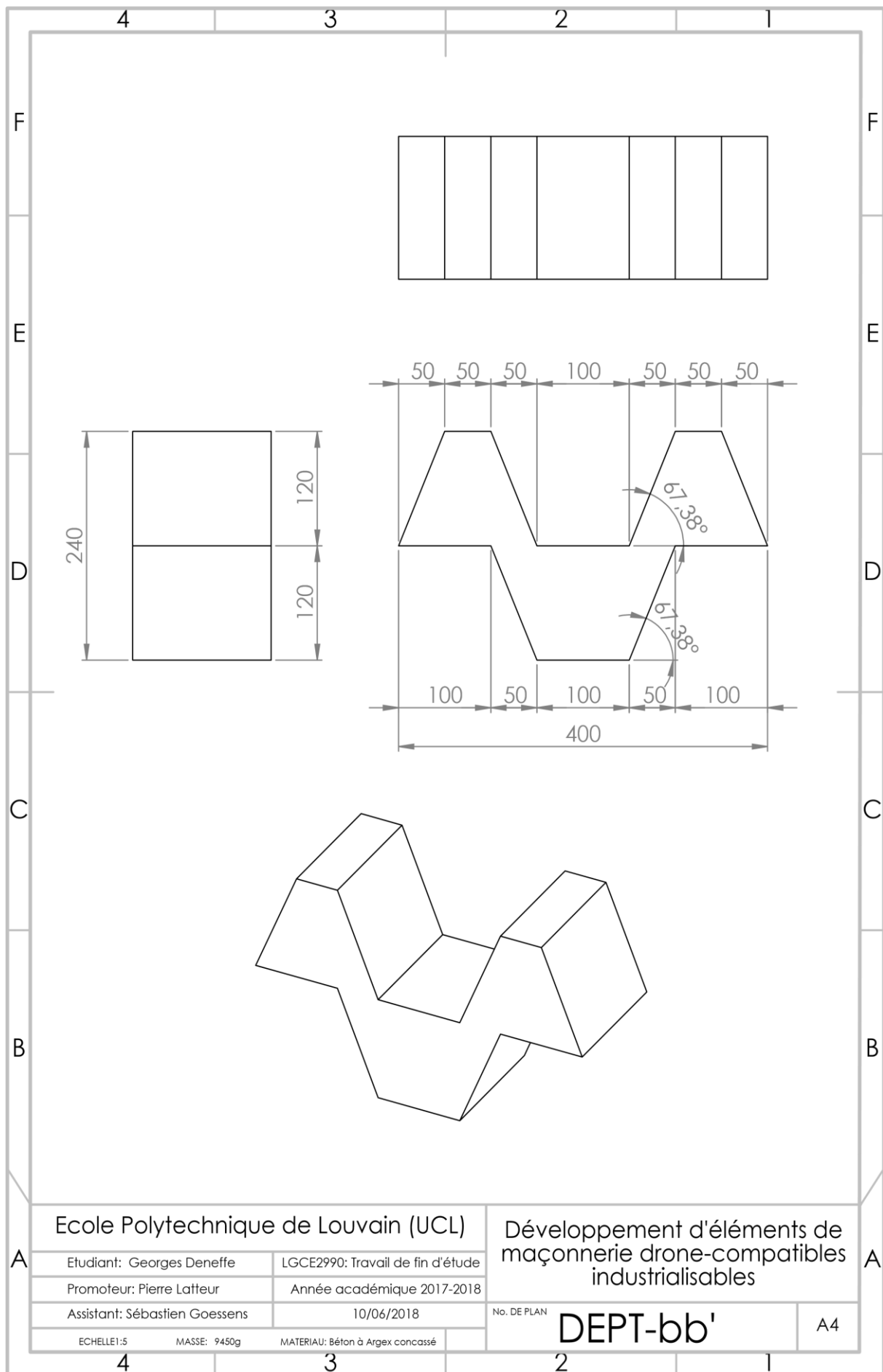


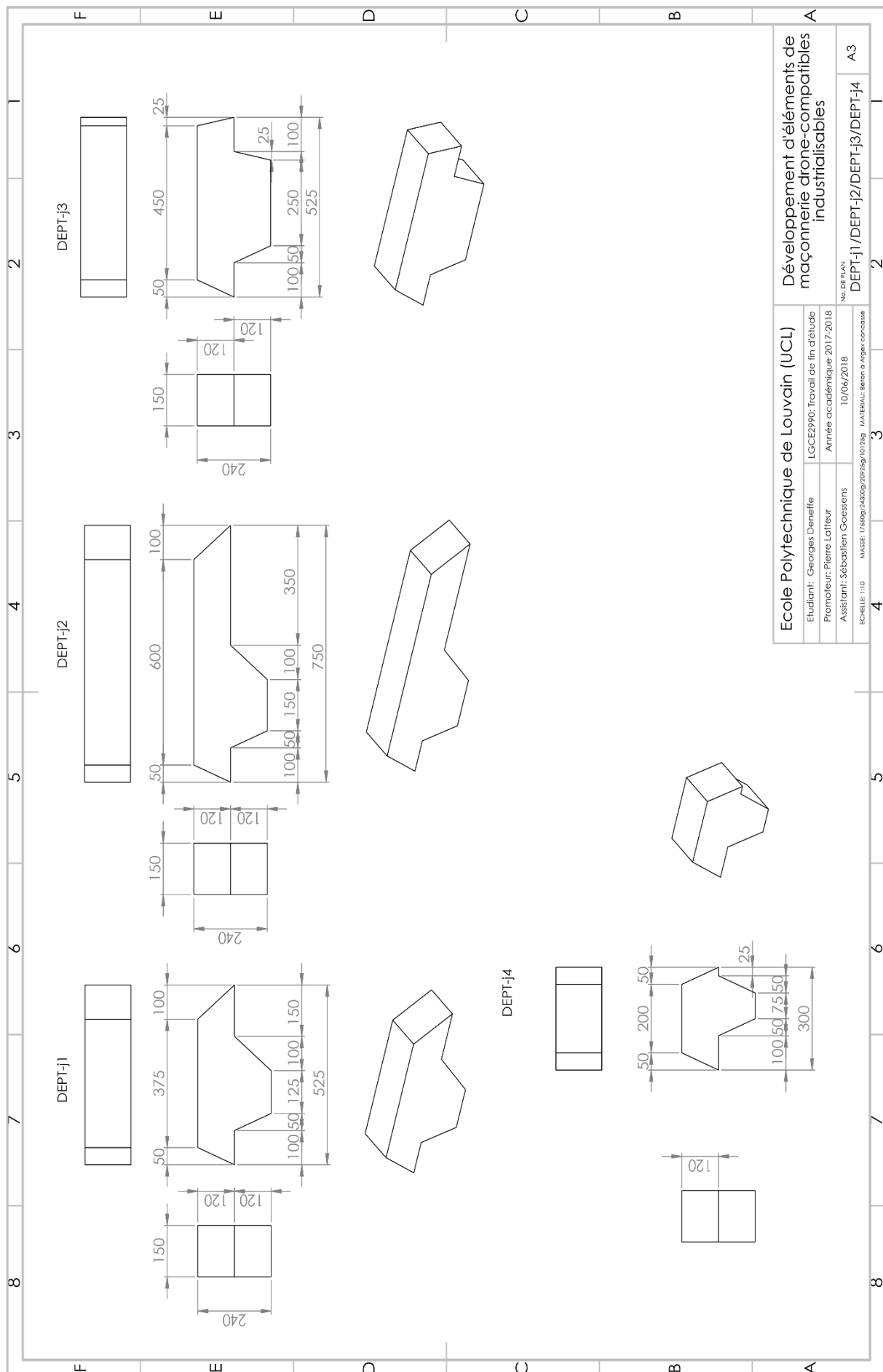












## B.1. Précisions dimensionnelles de DEPT d'essais par moule

|                         | Moule | m     | delta | l     | delta | e     | delta | a     | delta | h1    | delta | h2    | delta | alpha1 | delta | alpha2 | delta | Global            |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|-------------------|
| Théorique               | /     | 13500 | 0     | 400   | 0     | 150   | 0     | 100   | 0     | 120   | 0     | 120   | 0     | 67,38  | 0     | 67,38  | 0     |                   |
| DC01                    | M1    | 12250 | 1250  | 396   | 4     | 154   | 4     | 102   | 2     | 118   | 2     | 121   | 1     | 66,5   | 0,88  | 70     | 2,62  |                   |
| DC02                    | M1    | 11500 | 2000  | 391   | 9     | 146   | 4     | 96    | 4     | 120   | 0     | 120   | 0     | 69,5   | 2,12  | 65     | 2,38  |                   |
| DC03                    | M1    | 12100 | 1400  | 391   | 9     | 148   | 2     | 100   | 0     | 117   | 3     | 123   | 3     | 67,5   | 0,12  | 70     | 2,62  | Précision globale |
| DC04                    | M1    | 11750 | 1750  | 395   | 5     | 149   | 1     | 97    | 3     | 119   | 1     | 118   | 2     | 66     | 1,38  | 66     | 1,38  | (hors masse) (%)  |
| Précisions obtenues (%) |       | 88,15 |       | 98,31 |       | 98,17 |       | 97,75 |       | 98,75 |       | 98,75 |       | 98,33  |       | 96,66  |       | 98,10             |
| DC05                    | M2    | 13700 | 200   | 397   | 3     | 153   | 3     | 96    | 4     | 120   | 0     | 119   | 1     | 66     | 1,38  | 69     | 1,62  |                   |
| DC06                    | M2    | 14300 | 800   | 395   | 5     | 157   | 7     | 104   | 4     | 125   | 5     | 119   | 1     | 67     | 0,38  | 69     | 1,62  |                   |
| DC07                    | M2    | 14100 | 600   | 400   | 0     | 157   | 7     | 102   | 2     | 118   | 2     | 118   | 2     | 64     | 3,38  | 65     | 2,38  |                   |
| DC08                    | M2    | 13700 | 200   | 395   | 5     | 156   | 6     | 100   | 0     | 120   | 0     | 119   | 1     | 70     | 2,62  | 67     | 0,38  |                   |
| DC09                    | M2    | 13150 | 350   | 398   | 2     | 152   | 2     | 99    | 1     | 118   | 2     | 123   | 3     | 67     | 0,38  | 69,5   | 2,12  |                   |
| DC10                    | M2    | 12700 | 800   | 397   | 3     | 153   | 3     | 98    | 2     | 118   | 2     | 119   | 1     | 66     | 1,38  | 67     | 0,38  | Précision globale |
| DC12                    | M2    | 12400 | 1100  | 401   | 1     | 152   | 2     | 95    | 5     | 120   | 0     | 119   | 1     | 66,5   | 0,88  | 68     | 0,62  | (hors masse) (%)  |
| Précisions obtenues (%) |       | 95,71 |       | 99,32 |       | 97,14 |       | 97,43 |       | 98,69 |       | 98,81 |       | 97,80  |       | 98,07  |       | 98,18             |
| DC13                    | M3    | 13750 | 250   | 405   | 5     | 148   | 2     | 105   | 5     | 121   | 1     | 119   | 1     | 68     | 0,62  | 67     | 0,38  |                   |
| DC14                    | M3    | 14050 | 550   | 405   | 5     | 152   | 2     | 95    | 5     | 109   | 11    | 119   | 1     | 67     | 0,38  | 67,5   | 0,12  |                   |
| DC15                    | M3    | 13950 | 450   | 403   | 3     | 151   | 1     | 108   | 8     | 122   | 2     | 120   | 0     | 68     | 0,62  | 68     | 0,62  |                   |
| DC16                    | M3    | 13900 | 400   | 404   | 4     | 151   | 1     | 108   | 8     | 120   | 0     | 118   | 2     | 68     | 0,62  | 66     | 1,38  |                   |
| DC17                    | M3    | 13420 | 80    | 403   | 3     | 151   | 1     | 107   | 7     | 121   | 1     | 119   | 1     | 68,5   | 1,12  | 67,5   | 0,12  |                   |
| DC18                    | M3    | 12850 | 650   | 403   | 3     | 145   | 5     | 105   | 5     | 123   | 3     | 124   | 4     | 70     | 2,62  | 67     | 0,38  |                   |
| DC19                    | M3    | 13500 | 0     | 405   | 5     | 150   | 0     | 103   | 3     | 123   | 3     | 120   | 0     | 68     | 0,62  | 67     | 0,38  |                   |
| DC20                    | M3    | 11700 | 1800  | 396   | 4     | 150   | 0     | 98    | 2     | 121   | 1     | 120   | 0     | 67     | 0,38  | 68     | 0,62  |                   |
| DC21                    | M3    | 13100 | 400   | 403   | 3     | 151   | 1     | 104   | 4     | 123   | 3     | 119   | 1     | 68     | 0,62  | 66,5   | 0,88  |                   |
| DC22                    | M3    | 12650 | 850   | 402   | 2     | 150   | 0     | 102   | 2     | 122   | 2     | 120   | 0     | 68     | 0,62  | 66,5   | 0,88  |                   |
| DC23                    | M3    | 12900 | 600   | 403   | 3     | 152   | 2     | 102   | 2     | 123   | 3     | 121   | 1     | 68     | 0,62  | 67     | 0,38  |                   |
| DC24                    | M3    | 13050 | 450   | 402   | 2     | 150   | 0     | 104   | 4     | 122   | 2     | 119   | 1     | 69,5   | 2,12  | 67     | 0,38  |                   |
| DC25                    | M3    | 12850 | 650   | 400   | 0     | 150   | 0     | 99    | 1     | 121   | 1     | 120   | 0     | 69     | 1,62  | 67,5   | 0,12  |                   |
| DC26                    | M3    | 13350 | 150   | 404   | 4     | 149   | 1     | 102   | 2     | 122   | 2     | 123   | 3     | 68     | 0,62  | 67     | 0,38  |                   |
| DC27                    | M3    | 13150 | 350   | 404   | 4     | 154   | 4     | 104   | 4     | 120   | 0     | 119   | 1     | 67,5   | 0,12  | 67,5   | 0,12  |                   |
| DC28                    | M3    | 13300 | 200   | 402   | 2     | 149   | 1     | 103   | 3     | 120   | 0     | 119   | 1     | 68     | 0,62  | 68,5   | 1,12  |                   |
| DC29                    | M3    | 13250 | 250   | 403   | 3     | 151   | 1     | 99    | 1     | 122   | 2     | 120   | 0     | 69     | 1,62  | 64     | 3,38  |                   |
| DC30                    | M3    | 13050 | 450   | 401   | 1     | 150   | 0     | 98    | 2     | 120   | 0     | 120   | 0     | 68     | 0,62  | 65     | 2,38  |                   |
| DC'1                    | M3    | 8900  | 550   | 399   | 1     | 150   | 0     | /     | /     | 123   | 3     | /     | /     | 67     | 0,38  | /      | /     |                   |
| DC'2                    | M3    | 8550  | 900   | 398   | 2     | 145   | 5     | /     | /     | 123   | 3     | /     | /     | 67     | 0,38  | /      | /     |                   |
| DC'3                    | M3    | 9280  | 170   | 400   | 0     | 152   | 2     | /     | /     | 122   | 2     | /     | /     | 68,5   | 1,12  | /      | /     |                   |
| DC'4                    | M3    | 8500  | 950   | 399   | 1     | 148   | 2     | /     | /     | 122   | 2     | /     | /     | 66,5   | 0,88  | /      | /     |                   |
| DC'5                    | M3    | 8950  | 500   | 400   | 0     | 147   | 3     | /     | /     | 121   | 1     | /     | /     | 68     | 0,62  | /      | /     |                   |
| DC'6                    | M3    | 8950  | 500   | 392   | 8     | 159   | 9     | /     | /     | 120   | 0     | /     | /     | 67,5   | 0,12  | /      | /     |                   |
| DC'7                    | M3    | 9100  | 350   | 390   | 10    | 151   | 1     | /     | /     | 121   | 1     | /     | /     | 68,5   | 1,12  | /      | /     |                   |
| DC''1                   | M3    | 4350  | 150   | 197   | 3     | 151   | 1     | /     | /     | 121   | 1     | /     | /     | 69     | 1,62  | /      | /     | Précision globale |
| DC''2                   | M3    | 4200  | 300   | 196   | 4     | 151   | 1     | /     | /     | 121   | 1     | /     | /     | 68     | 0,62  | /      | /     | (hors masse) (%)  |
| Précisions obtenues (%) |       | 96,49 |       | 99,22 |       | 98,86 |       | 96,22 |       | 98,43 |       | 99,21 |       | 98,73  |       | 98,84  |       | 98,50             |
| DC31                    | M4    | 13700 | 200   | 398   | 2     | 150   | 0     | 99    | 1     | 120   | 0     | 119,5 | 0,5   | 67     | 0,38  | 68     | 0,62  |                   |
| DC32                    | M4    | 14150 | 650   | 399,5 | 0,5   | 149   | 1     | 100,5 | 0,5   | 121   | 1     | 119,5 | 0,5   | 67     | 0,38  | 68     | 0,62  |                   |
| DC33                    | M4    | 13950 | 450   | 400   | 0     | 149,5 | 0,5   | 100   | 0     | 119,5 | 0,5   | 120   | 0     | 67     | 0,38  | 68     | 0,62  |                   |
| DC34                    | M4    | 13900 | 400   | 398,5 | 1,5   | 149,5 | 0,5   | 100,5 | 0,5   | 120,5 | 0,5   | 120   | 0     | 67     | 0,38  | 68     | 0,62  |                   |
| DC35                    | M4    | 13150 | 350   | 399,5 | 0,5   | 149   | 1     | 100,5 | 0,5   | 120,5 | 0,5   | 119,5 | 0,5   | 67     | 0,38  | 68     | 0,62  |                   |
| DC36                    | M4    | 13650 | 150   | 399   | 1     | 146   | 4     | 101   | 1     | 120   | 0     | 120   | 0     | 67     | 0,38  | 68     | 0,62  | Précision globale |
| DC37                    | M4    | 14150 | 650   | 399,5 | 0,5   | 148,5 | 1,5   | 100   | 0     | 119,5 | 0,5   | 120   | 0     | 67,5   | 0,12  | 68     | 0,62  | (hors masse) (%)  |
| Précisions obtenues (%) |       | 96,98 |       | 99,79 |       | 99,19 |       | 99,50 |       | 99,64 |       | 99,82 |       | 99,49  |       | 99,08  |       | 99,50             |

## B.2. Compositions de béton utilisées

| COMPO 1 (03/04/18)                |          |                |       |               |       |      |                       |
|-----------------------------------|----------|----------------|-------|---------------|-------|------|-----------------------|
| CIMENT                            | 9        | 0,75           | 8,25  | kg pour 19,2L | 0,487 | kg/L | 4,38 kg/DEPT          |
| ARGEX CONCASSE                    | 21,1     | 9,2            | 11,9  | kg pour 19,2L | 0,702 | kg/L | 6,32 kg/DEPT          |
| EAU                               |          |                | 6,8   | L pour 19,2L  | 0,401 | L/L  | 3,61 L/DEPT           |
| + entraîneur d'air et plastifiant |          |                |       |               |       |      |                       |
| VOLUME BLOC TEST                  | 0,003375 | m <sup>3</sup> | 2     | 6,75          | L     |      |                       |
| VOLUME DRICK                      | 0,009    | m <sup>3</sup> | 1     | 9             | L     |      | Poids vol. obtenu     |
| BETON EXCEDENT                    | 0,0012   | m <sup>3</sup> | 1     | 1,2           | L     |      | 1300kg/m <sup>3</sup> |
| TOTAL                             | 0,01695  | m <sup>3</sup> |       | 16,95         | L     |      |                       |
| COMPO 2 (09/04/18)                |          |                |       |               |       |      |                       |
| CIMENT                            | 50,75    | 18,35          | 32,4  | kg pour 64,6L | 0,607 | kg/L | 5,47 kg/DEPT          |
| ARGEX CONCASSE                    | 48       | 13,35          | 34,65 | kg pour 64,6L | 0,649 | kg/L | 5,85 kg/DEPT          |
| EAU                               |          |                | 22,5  | L pour 64,6L  | 0,422 | L/L  | 3,80 L/DEPT           |
| + entraîneur d'air et plastifiant |          |                |       |               |       |      |                       |
| VOLUME BLOC TEST                  | 0,003375 | m <sup>3</sup> | 2     | 6,75          | L     |      |                       |
| VOLUME DRICK                      | 0,009    | m <sup>3</sup> | 5     | 45            | L     |      | Poids vol. obtenu     |
| BETON EXCEDENT                    | 0,0016   | m <sup>3</sup> | 1     | 1,6           | L     |      | 1434kg/m <sup>3</sup> |
| TOTAL                             | 0,01735  | m <sup>3</sup> |       | 53,35         | L     |      |                       |
| COMPO 3 (13/04/18)                |          |                |       |               |       |      |                       |
| CIMENT                            | 43,35    | 11,85          | 31,5  | kg pour 63,7L | 0,601 | kg/L | 5,41 kg/DEPT          |
| ARGEX CONCASSE                    | 40,35    | 9,4            | 30,95 | kg pour 63,7L | 0,590 | kg/L | 5,31 kg/DEPT          |
| EAU                               |          |                | 22,2  | L pour 63,7L  | 0,423 | L/L  | 3,81 L/DEPT           |
| + entraîneur d'air et plastifiant |          |                |       |               |       |      |                       |
| VOLUME BLOC TEST                  | 0,003375 | m <sup>3</sup> | 2     | 6,75          | L     |      |                       |
| VOLUME DRICK                      | 0,009    | m <sup>3</sup> | 5     | 45            | L     |      | Poids vol. obtenu     |
| BETON EXCEDENT                    | 0,0007   | m <sup>3</sup> | 1     | 0,7           | L     |      | 1469kg/m <sup>3</sup> |
| TOTAL                             | 0,01645  | m <sup>3</sup> | 8     | 52,45         | L     |      |                       |
| COMPO 4 (17-28/05/18)             |          |                |       |               |       |      |                       |
| CIMENT                            | 43,35    | 11,85          | 6,1   | kg pour 9,9L  | 0,616 | kg/L | 5,55 kg/DEPT          |
| ARGEX CONCASSE                    | 40,35    | 9,4            | 6,1   | kg pour 9,9L  | 0,616 | kg/L | 5,55 kg/DEPT          |
| EAU                               |          |                | 4,3   | L pour 9,9L   | 0,434 | L/L  | 3,91 L/DEPT           |
| + entraîneur d'air et plastifiant |          |                |       |               |       |      |                       |
| VOLUME BLOC TEST                  | 0,003375 | m <sup>3</sup> | 0     | 0             | L     |      |                       |
| VOLUME DRICK                      | 0,009    | m <sup>3</sup> | 1     | 9             | L     |      | Poids vol. obtenu     |
| BETON EXCEDENT                    | 0,0009   | m <sup>3</sup> | 1     | 0,9           | L     |      | 1534kg/m <sup>3</sup> |
| TOTAL                             | 0,01665  | m <sup>3</sup> | 2     | 9,9           | L     |      |                       |

### B.3. Essais de compression sur cubes

#### Photo de l'essai



#### Résultats d'essais

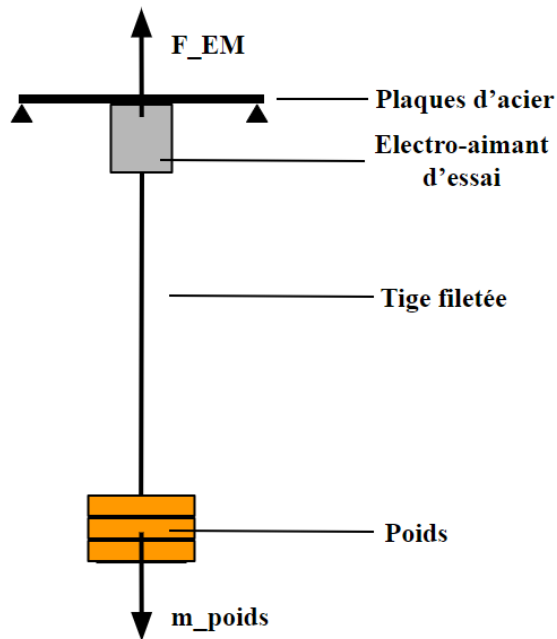
| Cube d'essai | Composition                    | Largeur<br>(mm) | Longueur<br>(mm) | Hauteur<br>(mm) | Volume<br>(m3) | Masse<br>(kg) | Séchage<br>(jours) | Densité<br>(kg/m3) | Charge max.<br>(T) | Résistance<br>(MPa) |
|--------------|--------------------------------|-----------------|------------------|-----------------|----------------|---------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| DT01         | 1                              | 150             | 150              | 150             | 0,003375       | 4,365         | 63                 | 1293               | 45,25              | 19,73               |
| DT02         | 1                              | 150             | 150              | 150             | 0,003375       | 4,485         | 63                 | 1329               | 36,00              | 15,70               |
| DT03         | 2                              | 150             | 150              | 150             | 0,003375       | 4,810         | 58                 | 1425               | 39,50              | 17,22               |
| DT04         | 2                              | 150             | 150              | 150             | 0,003375       | 4,865         | 58                 | 1441               | 49,00              | 21,36               |
| DT05         | 3                              | 150             | 150              | 150             | 0,003375       | 5,005         | 54                 | 1483               | 47,50              | 20,71               |
| DT06         | 3                              | 150             | 150              | 150             | 0,003375       | 4,930         | 54                 | 1461               | 50,25              | 21,91               |
|              |                                |                 |                  |                 |                |               |                    |                    |                    |                     |
|              | Résistance composition 1 (MPa) |                 |                  | =               | 17,7125        | MPa           |                    |                    |                    |                     |
|              | Résistance composition 2 (MPa) |                 |                  | =               | 19,293         | MPa           |                    |                    |                    |                     |
|              | Résistance composition 3 (MPa) |                 |                  | =               | 21,3095        | MPa           |                    |                    |                    |                     |

## B.4. Essai de chargement des électro-aimants

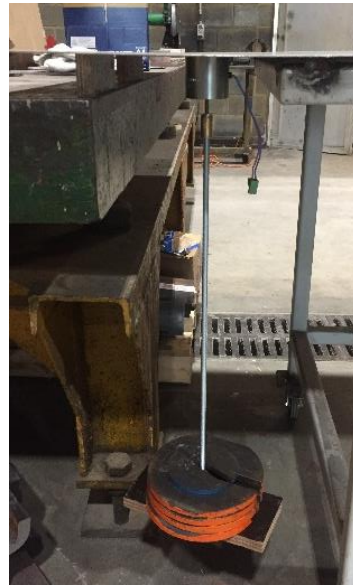
### Objectif de l'essai

- mesurer la force électromagnétique générée par un électro-aimant utilisé lors des essais de préhension manuels et par drone avec le GGS-EM en contact avec des plaques d'acier d'épaisseur et de qualité de surface différente
- déterminer le graphe de la force électromagnétique en fonction des paramètres épaisseur et qualité de surface des plaques d'acier

### Schéma de l'essai



### Photo



### Hypothèse

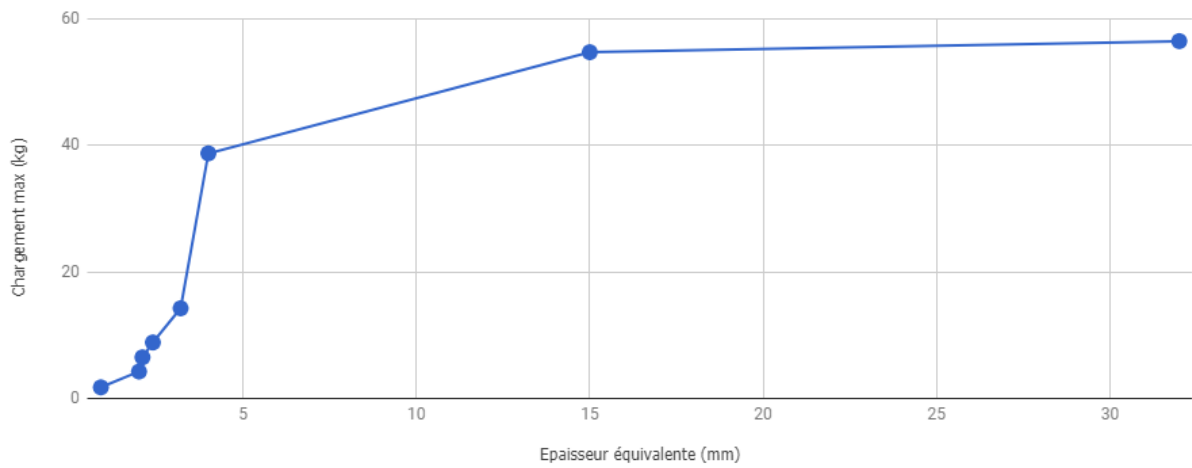
Epaisseur de plaque « équivalente » correspond à l'épaisseur réelle de la plaque multipliée par un coefficient de la qualité de surface de la plaque

### Procédure

- la tige filetée est vissée dans l'électro-aimants et est rentrée dans une planche en bois servant de plateforme de mise en place des poids.
- l'électro-aimant est mis en contact avec la plaque d'acier maintenue horizontalement entre deux tables
- la plateforme en bois est chargée en poids de 0,5kg à 5kg jusqu'à atteindre la force électromagnétique générée par l'électro-aimant

## Résultats

| EPAISSEUR (mm) | QUALITE (/10) | EPAISSEUR EQ. (mm) | CHARGEMENT MAX. (kg) |
|----------------|---------------|--------------------|----------------------|
| 1              | 9             | 0,9                | 1,75                 |
| 2              | 10            | 2                  | 4,25                 |
| 3,5            | 6             | 2,1                | 6,5                  |
| 3              | 8             | 2,4                | 8,85                 |
| 4              | 8             | 3,2                | 14,25                |
| 10             | 4             | 4                  | 38,75                |
| 25             | 6             | 15                 | 54,75                |
| 40             | 8             | 32                 | 56,5                 |



## Conclusion

- augmentation forte de la force électromagnétique avec l'épaisseur équivalente de la plaque d'acier
- après 40kg, on approche la force électromagnétique maximale de l'électro-aimant, estimée à 570N (58kg)

## B.5. Liste des blocs fabriqués

| DENOMINATION | DATE FAB. | TYPE      | MOULE | COMPO    | GGs-EA | GGs-T | GGs-G | INCL. LAT. | DIMENSIONS |
|--------------|-----------|-----------|-------|----------|--------|-------|-------|------------|------------|
| DC01         | 3/11/17   | MUR       | 1     | Inconnue | X      | X     | V     | X          | V          |
| DC02         | 7/11/17   | MUR       | 1     | Inconnue | X      | X     | V     | X          | X          |
| DC03         | 9/11/17   | MUR       | 1     | Inconnue | V      | X     | V     | X          | V          |
| DC04         | 10/11/17  | MUR       | 1     | Inconnue | V      | X     | V     | X          | V          |
| DC05         | 7/12/17   | MUR       | 2     | Inconnue | X      | X     | V     | X          | V          |
| DC06         | 7/12/17   | MUR       | 2     | Inconnue | X      | X     | V     | X          | X          |
| DC07         | 7/12/17   | MUR       | 2     | Inconnue | X      | X     | V     | X          | X          |
| DC08         | 7/12/17   | MUR       | 2     | Inconnue | X      | X     | V     | X          | X          |
| DC09         | 17/01/18  | MUR       | 2     | Inconnue | V      | X     | V     | X          | V          |
| DC10         | 17/01/18  | MUR       | 2     | Inconnue | V      | X     | V     | X          | V          |
| DC11         | 17/01/18  | MUR       | 2     | Inconnue | V      | X     | V     | X          | V          |
| DC12         | 17/01/18  | MUR       | 2     | Inconnue | V      | X     | V     | X          | V          |
| DC13         | 21/02/18  | MUR       | 3     | Inconnue | V      | X     | V     | X          | V          |
| DC14         | 21/02/18  | MUR       | 3     | Inconnue | V      | X     | V     | X          | V          |
| DC15         | 21/02/18  | MUR       | 3     | Inconnue | V      | X     | V     | X          | V          |
| DC16         | 21/02/18  | MUR       | 3     | Inconnue | V      | X     | V     | X          | V          |
| DC17         | 07/03/18  | MUR       | 3     | Inconnue | V      | X     | V     | X          | V          |
| DC18         | 07/03/18  | MUR       | 3     | Inconnue | V      | X     | V     | X          | V          |
| DC19         | 07/03/18  | MUR       | 3     | Inconnue | V      | X     | V     | X          | V          |
| DC20         | 03/04/18  | MUR       | 3     | 1        | X      | V     | V     | X          | V          |
| DC21         | 09/04/18  | MUR       | 3     | 2        | X      | V     | V     | X          | X          |
| DC22         | 09/04/18  | MUR       | 3     | 2        | X      | V     | V     | X          | V          |
| DC23         | 09/04/18  | MUR       | 3     | 2        | X      | V     | V     | X          | V          |
| DC24         | 09/04/18  | MUR       | 3     | 2        | X      | V     | V     | X          | V          |
| DC25         | 09/04/18  | MUR       | 3     | 2        | X      | V     | V     | X          | V          |
| DC26         | 13/04/18  | MUR       | 3     | 3        | X      | V     | V     | X          | V          |
| DC27         | 13/04/18  | MUR       | 3     | 3        | X      | V     | V     | X          | V          |
| DC28         | 13/04/18  | MUR       | 3     | 3        | V      | X     | V     | V          | V          |
| DC29         | 13/04/18  | MUR       | 3     | 3        | V      | X     | V     | V          | X          |
| DC30         | 13/04/18  | MUR       | 3     | 3        | V      | X     | V     | V          | V          |
| DC31         | 17/05/18  | MUR       | 4     | 4        | X      | X     | V     | X          | VV         |
| DC32         | 18/05/18  | MUR       | 4     | 4        | X      | X     | V     | X          | VV         |
| DC33         | 22/05/18  | MUR       | 4     | 4        | X      | X     | V     | X          | VV         |
| DC34         | 23/05/18  | MUR       | 4     | 4        | X      | X     | V     | X          | VV         |
| DC35         | 24/05/18  | MUR       | 4     | 4        | X      | X     | V     | X          | VV         |
| DC36         | 25/05/18  | MUR       | 4     | 4        | X      | X     | V     | X          | VV         |
| DC37         | 28/05/18  | MUR       | 4     | 4        | X      | X     | V     | X          | VV         |
| DCB'1        | 07/03/18  | BASE      | 3     | Inconnue | /      | /     | /     | /          | /          |
| DCB'2        | 07/03/18  | BASE      | 3     | Inconnue | /      | /     | /     | /          | /          |
| DCB'3        | 14/03/18  | BASE      | 3     | Inconnue | /      | /     | /     | /          | /          |
| DCB'4        | 14/03/18  | BASE      | 3     | Inconnue | /      | /     | /     | /          | /          |
| DCB'5        | 14/03/18  | BASE      | 3     | Inconnue | /      | /     | /     | /          | /          |
| DCB'6        | 14/03/18  | BASE      | 3     | Inconnue | /      | /     | /     | /          | /          |
| DCB'7        | 14/03/18  | BASE      | 3     | Inconnue | /      | /     | /     | /          | /          |
| DCB''1       | 07/03/18  | BASE EXT. | 3     | Inconnue | /      | /     | /     | /          | /          |
| DCB''2       | 07/03/18  | BASE EXT. | 3     | Inconnue | /      | /     | /     | /          | /          |

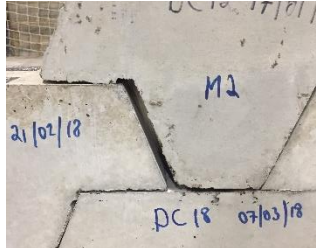
## C.1. Essais de pose

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                     |                |       |                        |      |                |      |             |      |                |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |      |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |       |                |     |                        |  |         |  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-------|------------------------|------|----------------|------|-------------|------|----------------|-------|----------------|------|----------------|------|----------------|------|----------------|------|--|--|--|--|----------------|-----|----------------|------|----------------|-----|----------------|------|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|------|----------------|-----|----------------|-----|------------------------|--|--------|--|----------------|-------|----------------|-----|------------------------|--|---------|--|
| Intitulé : Essai de pose EM1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Date : 28/03/2018                                                                                                   |                |       |                        |      |                |      |             |      |                |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |      |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |       |                |     |                        |  |         |  |
| Eléments d'essai : DC12 à DC19<br>Ordre de pose : DC19 à DC12<br>GGS : GGS-EM, enclenchement par interrupteur manuel                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Elément de base d'essai : DCB1 à DCB5<br>Ecart en éléments de bas d'essai : 102mm<br>Ecart rails de guidage : 154mm |                |       |                        |      |                |      |             |      |                |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |      |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |       |                |     |                        |  |         |  |
| Photos :                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                     |                |       |                        |      |                |      |             |      |                |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |      |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |       |                |     |                        |  |         |  |
| <div></div> <div></div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                     |                |       |                        |      |                |      |             |      |                |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |      |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |       |                |     |                        |  |         |  |
| Mesures :                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                     |                |       |                        |      |                |      |             |      |                |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |      |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |       |                |     |                        |  |         |  |
| <table><tr><td><math>\%_{DEPT}</math></td><td>100%</td><td><math>\alpha_{s,V}</math></td><td>88,8°</td><td><math>\alpha_{s,L}</math></td><td>0,8°</td><td><math>\alpha_{s,l}</math></td><td>3,8°</td></tr><tr><td><math>\alpha_{i,L}</math></td><td>1,2°</td><td><math>\alpha_{i,l}</math></td><td>0,7°</td><td colspan="4"></td></tr><tr><td><math>\delta_{l,1}</math></td><td>2mm</td><td><math>\delta_{l,2}</math></td><td>16mm</td><td><math>\delta_{h,1}</math></td><td>8mm</td><td><math>\delta_{h,2}</math></td><td>14mm</td></tr><tr><td><math>\delta_{l,3}</math></td><td>4mm</td><td><math>\delta_{l,4}</math></td><td>1mm</td><td><math>\delta_{h,3}</math></td><td>7mm</td><td><math>\delta_{h,4}</math></td><td>16mm</td></tr><tr><td><math>\delta_{l,5}</math></td><td>2mm</td><td><math>\delta_{l,6}</math></td><td>1mm</td><td colspan="2">Moyenne <math>\delta_{l,i}</math></td><td colspan="2">4,31mm</td></tr><tr><td><math>\delta_{l,7}</math></td><td>1,5mm</td><td><math>\delta_{l,8}</math></td><td>7mm</td><td colspan="2">Moyenne <math>\delta_{h,i}</math></td><td colspan="2">11,25mm</td></tr></table> |                                                                                                                     |                |       |                        |      |                |      | $\%_{DEPT}$ | 100% | $\alpha_{s,V}$ | 88,8° | $\alpha_{s,L}$ | 0,8° | $\alpha_{s,l}$ | 3,8° | $\alpha_{i,L}$ | 1,2° | $\alpha_{i,l}$ | 0,7° |  |  |  |  | $\delta_{l,1}$ | 2mm | $\delta_{l,2}$ | 16mm | $\delta_{h,1}$ | 8mm | $\delta_{h,2}$ | 14mm | $\delta_{l,3}$ | 4mm | $\delta_{l,4}$ | 1mm | $\delta_{h,3}$ | 7mm | $\delta_{h,4}$ | 16mm | $\delta_{l,5}$ | 2mm | $\delta_{l,6}$ | 1mm | Moyenne $\delta_{l,i}$ |  | 4,31mm |  | $\delta_{l,7}$ | 1,5mm | $\delta_{l,8}$ | 7mm | Moyenne $\delta_{h,i}$ |  | 11,25mm |  |
| $\%_{DEPT}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 100%                                                                                                                | $\alpha_{s,V}$ | 88,8° | $\alpha_{s,L}$         | 0,8° | $\alpha_{s,l}$ | 3,8° |             |      |                |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |      |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |       |                |     |                        |  |         |  |
| $\alpha_{i,L}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 1,2°                                                                                                                | $\alpha_{i,l}$ | 0,7°  |                        |      |                |      |             |      |                |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |      |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |       |                |     |                        |  |         |  |
| $\delta_{l,1}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 2mm                                                                                                                 | $\delta_{l,2}$ | 16mm  | $\delta_{h,1}$         | 8mm  | $\delta_{h,2}$ | 14mm |             |      |                |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |      |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |       |                |     |                        |  |         |  |
| $\delta_{l,3}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 4mm                                                                                                                 | $\delta_{l,4}$ | 1mm   | $\delta_{h,3}$         | 7mm  | $\delta_{h,4}$ | 16mm |             |      |                |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |      |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |       |                |     |                        |  |         |  |
| $\delta_{l,5}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 2mm                                                                                                                 | $\delta_{l,6}$ | 1mm   | Moyenne $\delta_{l,i}$ |      | 4,31mm         |      |             |      |                |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |      |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |       |                |     |                        |  |         |  |
| $\delta_{l,7}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 1,5mm                                                                                                               | $\delta_{l,8}$ | 7mm   | Moyenne $\delta_{h,i}$ |      | 11,25mm        |      |             |      |                |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |      |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |       |                |     |                        |  |         |  |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                       |                |       |                        |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |      |                |      |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-------|------------------------|-------|----------------|------|----------------|------|----------------|------|----------------|------|--|--|--|--|----------------|-----|----------------|-----|----------------|------|----------------|------|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|------------------------|--|--------|--|----------------|-----|----------------|-----|------------------------|--|--------|--|
| Intitulé : Essai de pose EM2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Date : 29/03/2018                                                                                                     |                |       |                        |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |      |                |      |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |
| Eléments d'essai : DC12 à DC19<br>Ordre de pose : DC15 à DC12 puis DC19 à DC16<br>GGS : GGS-EM, enclenchement par interrupteur manuel                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Elément de base d'essai : DCB1 à DCB5<br>Ecart en éléments de bas d'essai : 102mm<br>Ecart rails de guidage : 151,5mm |                |       |                        |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |      |                |      |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |
| Photos :                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                       |                |       |                        |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |      |                |      |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |
| <div></div> <div><div></div></div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                       |                |       |                        |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |      |                |      |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |
| Mesures :                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                       |                |       |                        |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |      |                |      |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |
| <table><tr><td><math>\%_{DEPT}</math></td><td>71,4%</td><td><math>\alpha_{s,V}</math></td><td>89,2°</td><td><math>\alpha_{s,L}</math></td><td>0,6°</td><td><math>\alpha_{s,l}</math></td><td>0,2°</td></tr><tr><td><math>\alpha_{i,L}</math></td><td>0,7°</td><td><math>\alpha_{i,l}</math></td><td>0,4°</td><td colspan="4"></td></tr><tr><td><math>\delta_{l,1}</math></td><td>3mm</td><td><math>\delta_{l,2}</math></td><td>6mm</td><td><math>\delta_{h,1}</math></td><td>11mm</td><td><math>\delta_{h,2}</math></td><td>13mm</td></tr><tr><td><math>\delta_{l,3}</math></td><td>4mm</td><td><math>\delta_{l,4}</math></td><td>1mm</td><td><math>\delta_{h,3}</math></td><td>3mm</td><td><math>\delta_{h,4}</math></td><td>7mm</td></tr><tr><td><math>\delta_{l,5}</math></td><td>3mm</td><td><math>\delta_{l,6}</math></td><td>1mm</td><td colspan="2">Moyenne <math>\delta_{l,i}</math></td><td colspan="2">3,00mm</td></tr><tr><td><math>\delta_{l,7}</math></td><td>4mm</td><td><math>\delta_{l,8}</math></td><td>2mm</td><td colspan="2">Moyenne <math>\delta_{h,i}</math></td><td colspan="2">8,50mm</td></tr></table> |                                                                                                                       | $\%_{DEPT}$    | 71,4% | $\alpha_{s,V}$         | 89,2° | $\alpha_{s,L}$ | 0,6° | $\alpha_{s,l}$ | 0,2° | $\alpha_{i,L}$ | 0,7° | $\alpha_{i,l}$ | 0,4° |  |  |  |  | $\delta_{l,1}$ | 3mm | $\delta_{l,2}$ | 6mm | $\delta_{h,1}$ | 11mm | $\delta_{h,2}$ | 13mm | $\delta_{l,3}$ | 4mm | $\delta_{l,4}$ | 1mm | $\delta_{h,3}$ | 3mm | $\delta_{h,4}$ | 7mm | $\delta_{l,5}$ | 3mm | $\delta_{l,6}$ | 1mm | Moyenne $\delta_{l,i}$ |  | 3,00mm |  | $\delta_{l,7}$ | 4mm | $\delta_{l,8}$ | 2mm | Moyenne $\delta_{h,i}$ |  | 8,50mm |  |
| $\%_{DEPT}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 71,4%                                                                                                                 | $\alpha_{s,V}$ | 89,2° | $\alpha_{s,L}$         | 0,6°  | $\alpha_{s,l}$ | 0,2° |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |      |                |      |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |
| $\alpha_{i,L}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 0,7°                                                                                                                  | $\alpha_{i,l}$ | 0,4°  |                        |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |      |                |      |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |
| $\delta_{l,1}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 3mm                                                                                                                   | $\delta_{l,2}$ | 6mm   | $\delta_{h,1}$         | 11mm  | $\delta_{h,2}$ | 13mm |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |      |                |      |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |
| $\delta_{l,3}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 4mm                                                                                                                   | $\delta_{l,4}$ | 1mm   | $\delta_{h,3}$         | 3mm   | $\delta_{h,4}$ | 7mm  |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |      |                |      |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |
| $\delta_{l,5}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 3mm                                                                                                                   | $\delta_{l,6}$ | 1mm   | Moyenne $\delta_{l,i}$ |       | 3,00mm         |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |      |                |      |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |
| $\delta_{l,7}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 4mm                                                                                                                   | $\delta_{l,8}$ | 2mm   | Moyenne $\delta_{h,i}$ |       | 8,50mm         |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |      |                |      |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |

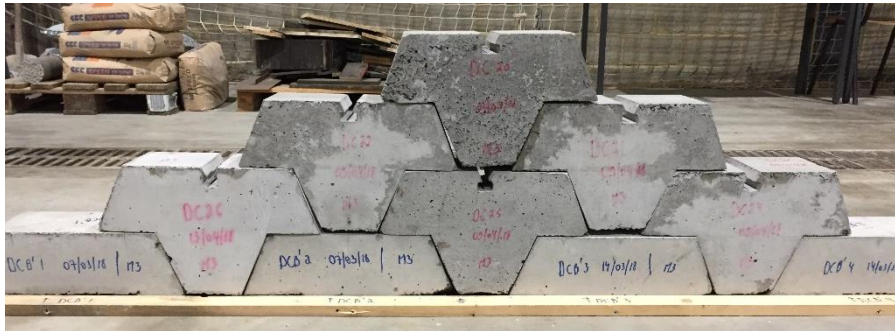
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                       |                |       |                        |      |                |      |             |       |                |       |                |      |                |      |                |       |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |         |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-------|------------------------|------|----------------|------|-------------|-------|----------------|-------|----------------|------|----------------|------|----------------|-------|----------------|------|--|--|--|--|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|------|----------------|-----|----------------|-----|----------------|------|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|------------------------|--|--------|--|----------------|-----|----------------|-----|------------------------|--|---------|--|
| Intitulé : Essai de pose EM3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Date : 28/03/2018                                                                                                     |                |       |                        |      |                |      |             |       |                |       |                |      |                |      |                |       |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |         |  |
| Eléments d'essai : DC12 à DC19<br>Ordre de pose : DC12 à DC19<br>GGS : GGS-EM, enclenchement par interrupteur manuel                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Elément de base d'essai : DCB1 à DCB5<br>Ecart en éléments de bas d'essai : 102mm<br>Ecart rails de guidage : 151,5mm |                |       |                        |      |                |      |             |       |                |       |                |      |                |      |                |       |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |         |  |
| Photos :                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                       |                |       |                        |      |                |      |             |       |                |       |                |      |                |      |                |       |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |         |  |
| <div></div> <div></div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                       |                |       |                        |      |                |      |             |       |                |       |                |      |                |      |                |       |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |         |  |
| Mesures :                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                       |                |       |                        |      |                |      |             |       |                |       |                |      |                |      |                |       |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |         |  |
| <table><tr><td><math>\%_{DEPT}</math></td><td>71,4%</td><td><math>\alpha_{s,V}</math></td><td>89,5°</td><td><math>\alpha_{s,L}</math></td><td>0,3°</td><td><math>\alpha_{s,l}</math></td><td>1,8°</td></tr><tr><td><math>\alpha_{i,L}</math></td><td>0,8 °</td><td><math>\alpha_{i,l}</math></td><td>0,4°</td><td colspan="4"></td></tr><tr><td><math>\delta_{l,1}</math></td><td>0mm</td><td><math>\delta_{l,2}</math></td><td>2mm</td><td><math>\delta_{h,1}</math></td><td>7mm</td><td><math>\delta_{h,2}</math></td><td>16mm</td></tr><tr><td><math>\delta_{l,3}</math></td><td>1mm</td><td><math>\delta_{l,4}</math></td><td>3mm</td><td><math>\delta_{h,3}</math></td><td>11mm</td><td><math>\delta_{h,4}</math></td><td>8mm</td></tr><tr><td><math>\delta_{l,5}</math></td><td>2mm</td><td><math>\delta_{l,6}</math></td><td>1mm</td><td colspan="2">Moyenne <math>\delta_{l,i}</math></td><td colspan="2">2,00mm</td></tr><tr><td><math>\delta_{l,7}</math></td><td>3mm</td><td><math>\delta_{l,8}</math></td><td>4mm</td><td colspan="2">Moyenne <math>\delta_{h,i}</math></td><td colspan="2">10,50mm</td></tr></table> |                                                                                                                       |                |       |                        |      |                |      | $\%_{DEPT}$ | 71,4% | $\alpha_{s,V}$ | 89,5° | $\alpha_{s,L}$ | 0,3° | $\alpha_{s,l}$ | 1,8° | $\alpha_{i,L}$ | 0,8 ° | $\alpha_{i,l}$ | 0,4° |  |  |  |  | $\delta_{l,1}$ | 0mm | $\delta_{l,2}$ | 2mm | $\delta_{h,1}$ | 7mm | $\delta_{h,2}$ | 16mm | $\delta_{l,3}$ | 1mm | $\delta_{l,4}$ | 3mm | $\delta_{h,3}$ | 11mm | $\delta_{h,4}$ | 8mm | $\delta_{l,5}$ | 2mm | $\delta_{l,6}$ | 1mm | Moyenne $\delta_{l,i}$ |  | 2,00mm |  | $\delta_{l,7}$ | 3mm | $\delta_{l,8}$ | 4mm | Moyenne $\delta_{h,i}$ |  | 10,50mm |  |
| $\%_{DEPT}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 71,4%                                                                                                                 | $\alpha_{s,V}$ | 89,5° | $\alpha_{s,L}$         | 0,3° | $\alpha_{s,l}$ | 1,8° |             |       |                |       |                |      |                |      |                |       |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |         |  |
| $\alpha_{i,L}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 0,8 °                                                                                                                 | $\alpha_{i,l}$ | 0,4°  |                        |      |                |      |             |       |                |       |                |      |                |      |                |       |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |         |  |
| $\delta_{l,1}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 0mm                                                                                                                   | $\delta_{l,2}$ | 2mm   | $\delta_{h,1}$         | 7mm  | $\delta_{h,2}$ | 16mm |             |       |                |       |                |      |                |      |                |       |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |         |  |
| $\delta_{l,3}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 1mm                                                                                                                   | $\delta_{l,4}$ | 3mm   | $\delta_{h,3}$         | 11mm | $\delta_{h,4}$ | 8mm  |             |       |                |       |                |      |                |      |                |       |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |         |  |
| $\delta_{l,5}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 2mm                                                                                                                   | $\delta_{l,6}$ | 1mm   | Moyenne $\delta_{l,i}$ |      | 2,00mm         |      |             |       |                |       |                |      |                |      |                |       |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |         |  |
| $\delta_{l,7}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 3mm                                                                                                                   | $\delta_{l,8}$ | 4mm   | Moyenne $\delta_{h,i}$ |      | 10,50mm        |      |             |       |                |       |                |      |                |      |                |       |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |         |  |

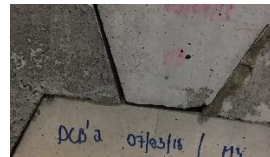
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                       |                |       |                        |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |         |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-------|------------------------|-------|----------------|------|----------------|------|----------------|------|----------------|------|--|--|--|--|----------------|-----|----------------|-----|----------------|------|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|------|----------------|-----|----------------|-----|------------------------|--|--------|--|----------------|-----|----------------|-----|------------------------|--|---------|--|
| Intitulé : Essai de pose EM4                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Date : 28/03/2018                                                                                                     |                |       |                        |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |         |  |
| Eléments d'essai : DC12 à DC19<br>Ordre de pose : DC16 à DC19 puis DC12 à DC15<br>GGS : GGS-EM, enclenchement par interrupteur manuel                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Elément de base d'essai : DCB1 à DCB5<br>Ecart en éléments de bas d'essai : 102mm<br>Ecart rails de guidage : 151,5mm |                |       |                        |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |         |  |
| Photos :                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                       |                |       |                        |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |         |  |
| <div></div> <div><div></div></div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                       |                |       |                        |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |         |  |
| Mesures :                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                       |                |       |                        |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |         |  |
| <table><tr><td>%DEPT</td><td>71,4%</td><td><math>\alpha_{s,V}</math></td><td>88,7°</td><td><math>\alpha_{s,L}</math></td><td>0,4°</td><td><math>\alpha_{s,l}</math></td><td>0,3°</td></tr><tr><td><math>\alpha_{i,L}</math></td><td>0,3°</td><td><math>\alpha_{i,l}</math></td><td>1,2°</td><td colspan="4"></td></tr><tr><td><math>\delta_{l,1}</math></td><td>4mm</td><td><math>\delta_{l,2}</math></td><td>3mm</td><td><math>\delta_{h,1}</math></td><td>15mm</td><td><math>\delta_{h,2}</math></td><td>7mm</td></tr><tr><td><math>\delta_{l,3}</math></td><td>2mm</td><td><math>\delta_{l,4}</math></td><td>1mm</td><td><math>\delta_{h,3}</math></td><td>7mm</td><td><math>\delta_{h,4}</math></td><td>22mm</td></tr><tr><td><math>\delta_{l,5}</math></td><td>5mm</td><td><math>\delta_{l,6}</math></td><td>0mm</td><td colspan="2">Moyenne <math>\delta_{l,i}</math></td><td colspan="2">2,63mm</td></tr><tr><td><math>\delta_{l,7}</math></td><td>4mm</td><td><math>\delta_{l,8}</math></td><td>2mm</td><td colspan="2">Moyenne <math>\delta_{h,i}</math></td><td colspan="2">12,75mm</td></tr></table> |                                                                                                                       | %DEPT          | 71,4% | $\alpha_{s,V}$         | 88,7° | $\alpha_{s,L}$ | 0,4° | $\alpha_{s,l}$ | 0,3° | $\alpha_{i,L}$ | 0,3° | $\alpha_{i,l}$ | 1,2° |  |  |  |  | $\delta_{l,1}$ | 4mm | $\delta_{l,2}$ | 3mm | $\delta_{h,1}$ | 15mm | $\delta_{h,2}$ | 7mm | $\delta_{l,3}$ | 2mm | $\delta_{l,4}$ | 1mm | $\delta_{h,3}$ | 7mm | $\delta_{h,4}$ | 22mm | $\delta_{l,5}$ | 5mm | $\delta_{l,6}$ | 0mm | Moyenne $\delta_{l,i}$ |  | 2,63mm |  | $\delta_{l,7}$ | 4mm | $\delta_{l,8}$ | 2mm | Moyenne $\delta_{h,i}$ |  | 12,75mm |  |
| %DEPT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 71,4%                                                                                                                 | $\alpha_{s,V}$ | 88,7° | $\alpha_{s,L}$         | 0,4°  | $\alpha_{s,l}$ | 0,3° |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |         |  |
| $\alpha_{i,L}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 0,3°                                                                                                                  | $\alpha_{i,l}$ | 1,2°  |                        |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |         |  |
| $\delta_{l,1}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 4mm                                                                                                                   | $\delta_{l,2}$ | 3mm   | $\delta_{h,1}$         | 15mm  | $\delta_{h,2}$ | 7mm  |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |         |  |
| $\delta_{l,3}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 2mm                                                                                                                   | $\delta_{l,4}$ | 1mm   | $\delta_{h,3}$         | 7mm   | $\delta_{h,4}$ | 22mm |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |         |  |
| $\delta_{l,5}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 5mm                                                                                                                   | $\delta_{l,6}$ | 0mm   | Moyenne $\delta_{l,i}$ |       | 2,63mm         |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |         |  |
| $\delta_{l,7}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 4mm                                                                                                                   | $\delta_{l,8}$ | 2mm   | Moyenne $\delta_{h,i}$ |       | 12,75mm        |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |         |  |

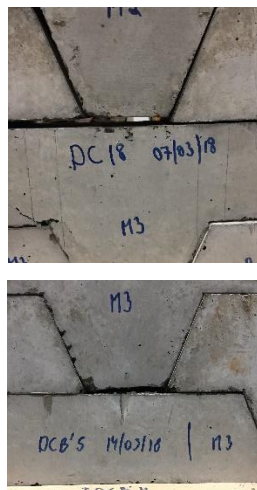
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                       |                |                |                        |                |                |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------|------------------------|----------------|----------------|----------------|------|----------------|------|----------------|------|--|--|--|--|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|------------------------|--|--------|--|----------------|-----|----------------|-----|------------------------|--|--------|--|--|
| Intitulé : Essai de pose EM5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Date : 02/04/2018                                                                                                     |                |                |                        |                |                |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |  |
| Eléments d'essai : DC12 à DC19<br>Ordre de pose : DC19 à DC12<br>GGS : GGS-EM, enclenchement par interrupteur manuel                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Elément de base d'essai : DCB1 à DCB5<br>Ecart en éléments de bas d'essai : 105mm<br>Ecart rails de guidage : 151,5mm |                |                |                        |                |                |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |  |
| Photos :                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                       |                |                |                        |                |                |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                       |                |                |                        |                |                |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                     |                |                |                        |                |                |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                  |                |                |                        |                |                |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |  |
| Mesures :                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                       |                |                |                        |                |                |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |  |
| <table><tr><td>%DEPT</td><td>71,4%</td><td><math>\alpha_{s,v}</math></td><td>87°</td><td><math>\alpha_{s,L}</math></td><td>2,2°</td><td><math>\alpha_{s,l}</math></td><td>2,5°</td></tr><tr><td><math>\alpha_{i,L}</math></td><td>0,6°</td><td><math>\alpha_{i,l}</math></td><td>0,5°</td><td colspan="4"></td></tr><tr><td><math>\delta_{l,1}</math></td><td>3mm</td><td><math>\delta_{l,2}</math></td><td>2mm</td><td><math>\delta_{h,1}</math></td><td>4mm</td><td><math>\delta_{h,2}</math></td><td>3mm</td></tr><tr><td><math>\delta_{l,3}</math></td><td>6mm</td><td><math>\delta_{l,4}</math></td><td>1mm</td><td><math>\delta_{h,3}</math></td><td>3mm</td><td><math>\delta_{h,4}</math></td><td>3mm</td></tr><tr><td><math>\delta_{l,5}</math></td><td>2mm</td><td><math>\delta_{l,6}</math></td><td>4mm</td><td colspan="2">Moyenne <math>\delta_{l,i}</math></td><td colspan="2">2,50mm</td></tr><tr><td><math>\delta_{l,7}</math></td><td>0mm</td><td><math>\delta_{l,8}</math></td><td>1mm</td><td colspan="2">Moyenne <math>\delta_{h,i}</math></td><td colspan="2">3,25mm</td></tr></table> | %DEPT                                                                                                                 | 71,4%          | $\alpha_{s,v}$ | 87°                    | $\alpha_{s,L}$ | 2,2°           | $\alpha_{s,l}$ | 2,5° | $\alpha_{i,L}$ | 0,6° | $\alpha_{i,l}$ | 0,5° |  |  |  |  | $\delta_{l,1}$ | 3mm | $\delta_{l,2}$ | 2mm | $\delta_{h,1}$ | 4mm | $\delta_{h,2}$ | 3mm | $\delta_{l,3}$ | 6mm | $\delta_{l,4}$ | 1mm | $\delta_{h,3}$ | 3mm | $\delta_{h,4}$ | 3mm | $\delta_{l,5}$ | 2mm | $\delta_{l,6}$ | 4mm | Moyenne $\delta_{l,i}$ |  | 2,50mm |  | $\delta_{l,7}$ | 0mm | $\delta_{l,8}$ | 1mm | Moyenne $\delta_{h,i}$ |  | 3,25mm |  |  |
| %DEPT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 71,4%                                                                                                                 | $\alpha_{s,v}$ | 87°            | $\alpha_{s,L}$         | 2,2°           | $\alpha_{s,l}$ | 2,5°           |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |  |
| $\alpha_{i,L}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0,6°                                                                                                                  | $\alpha_{i,l}$ | 0,5°           |                        |                |                |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |  |
| $\delta_{l,1}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 3mm                                                                                                                   | $\delta_{l,2}$ | 2mm            | $\delta_{h,1}$         | 4mm            | $\delta_{h,2}$ | 3mm            |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |  |
| $\delta_{l,3}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 6mm                                                                                                                   | $\delta_{l,4}$ | 1mm            | $\delta_{h,3}$         | 3mm            | $\delta_{h,4}$ | 3mm            |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |  |
| $\delta_{l,5}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 2mm                                                                                                                   | $\delta_{l,6}$ | 4mm            | Moyenne $\delta_{l,i}$ |                | 2,50mm         |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |  |
| $\delta_{l,7}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0mm                                                                                                                   | $\delta_{l,8}$ | 1mm            | Moyenne $\delta_{h,i}$ |                | 3,25mm         |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |  |

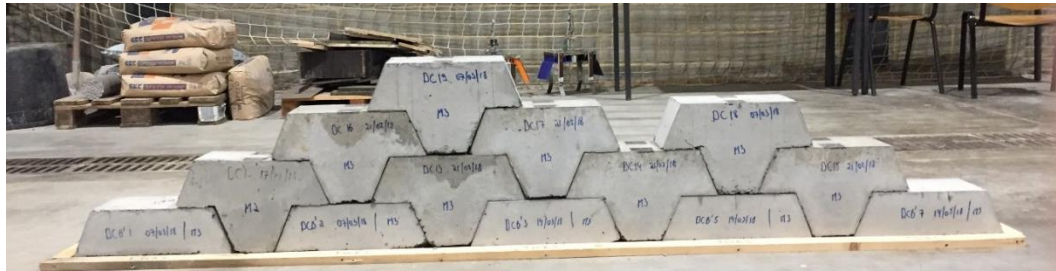
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                       |                |                |                        |                |                |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------|------------------------|----------------|----------------|----------------|------|----------------|------|----------------|------|--|--|--|--|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|------------------------|--|--------|--|----------------|-----|----------------|-----|------------------------|--|--------|--|--|
| Intitulé : Essai de pose EM6                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Date : 28/03/2018                                                                                                     |                |                |                        |                |                |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |  |
| Eléments d'essai : DC12 à DC19<br>Ordre de pose : DC12 à DC19<br>GGS : GGS-EM, enclenchement par interrupteur manuel                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Elément de base d'essai : DCB1 à DCB5<br>Ecart en éléments de bas d'essai : 105mm<br>Ecart rails de guidage : 151,5mm |                |                |                        |                |                |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |  |
| Photos :                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                       |                |                |                        |                |                |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |  |
| <div></div> <div></div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                       |                |                |                        |                |                |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |  |
| Mesures :                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                       |                |                |                        |                |                |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |  |
| <table><tr><td>%DEPT</td><td>100%</td><td><math>\alpha_{s,V}</math></td><td>87,8°</td><td><math>\alpha_{s,L}</math></td><td>0,9°</td><td><math>\alpha_{s,l}</math></td><td>1,8°</td></tr><tr><td><math>\alpha_{i,L}</math></td><td>0,7°</td><td><math>\alpha_{i,l}</math></td><td>1,4°</td><td colspan="4"></td></tr><tr><td><math>\delta_{l,1}</math></td><td>3mm</td><td><math>\delta_{l,2}</math></td><td>0mm</td><td><math>\delta_{h,1}</math></td><td>2mm</td><td><math>\delta_{h,2}</math></td><td>3mm</td></tr><tr><td><math>\delta_{l,3}</math></td><td>4mm</td><td><math>\delta_{l,4}</math></td><td>3mm</td><td><math>\delta_{h,3}</math></td><td>3mm</td><td><math>\delta_{h,4}</math></td><td>3mm</td></tr><tr><td><math>\delta_{l,5}</math></td><td>2mm</td><td><math>\delta_{l,6}</math></td><td>4mm</td><td colspan="2">Moyenne <math>\delta_{l,i}</math></td><td colspan="2">3,13mm</td></tr><tr><td><math>\delta_{l,7}</math></td><td>5mm</td><td><math>\delta_{l,8}</math></td><td>4mm</td><td colspan="2">Moyenne <math>\delta_{h,i}</math></td><td colspan="2">2,75mm</td></tr></table> | %DEPT                                                                                                                 | 100%           | $\alpha_{s,V}$ | 87,8°                  | $\alpha_{s,L}$ | 0,9°           | $\alpha_{s,l}$ | 1,8° | $\alpha_{i,L}$ | 0,7° | $\alpha_{i,l}$ | 1,4° |  |  |  |  | $\delta_{l,1}$ | 3mm | $\delta_{l,2}$ | 0mm | $\delta_{h,1}$ | 2mm | $\delta_{h,2}$ | 3mm | $\delta_{l,3}$ | 4mm | $\delta_{l,4}$ | 3mm | $\delta_{h,3}$ | 3mm | $\delta_{h,4}$ | 3mm | $\delta_{l,5}$ | 2mm | $\delta_{l,6}$ | 4mm | Moyenne $\delta_{l,i}$ |  | 3,13mm |  | $\delta_{l,7}$ | 5mm | $\delta_{l,8}$ | 4mm | Moyenne $\delta_{h,i}$ |  | 2,75mm |  |  |
| %DEPT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 100%                                                                                                                  | $\alpha_{s,V}$ | 87,8°          | $\alpha_{s,L}$         | 0,9°           | $\alpha_{s,l}$ | 1,8°           |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |  |
| $\alpha_{i,L}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0,7°                                                                                                                  | $\alpha_{i,l}$ | 1,4°           |                        |                |                |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |  |
| $\delta_{l,1}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 3mm                                                                                                                   | $\delta_{l,2}$ | 0mm            | $\delta_{h,1}$         | 2mm            | $\delta_{h,2}$ | 3mm            |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |  |
| $\delta_{l,3}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 4mm                                                                                                                   | $\delta_{l,4}$ | 3mm            | $\delta_{h,3}$         | 3mm            | $\delta_{h,4}$ | 3mm            |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |  |
| $\delta_{l,5}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 2mm                                                                                                                   | $\delta_{l,6}$ | 4mm            | Moyenne $\delta_{l,i}$ |                | 3,13mm         |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |  |
| $\delta_{l,7}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 5mm                                                                                                                   | $\delta_{l,8}$ | 4mm            | Moyenne $\delta_{h,i}$ |                | 2,75mm         |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |  |

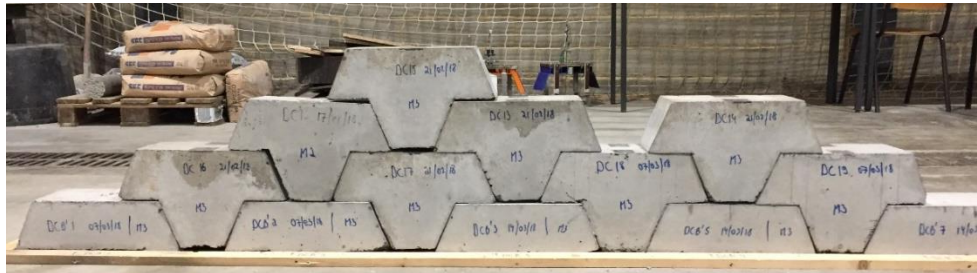
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                        |                |                |                        |                |                |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |   |                |   |                |   |                        |  |        |  |                |   |                |   |                        |  |         |  |  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------|------------------------|----------------|----------------|----------------|------|----------------|------|----------------|------|--|--|--|--|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|------|----------------|-----|----------------|-----|----------------|---|----------------|---|----------------|---|------------------------|--|--------|--|----------------|---|----------------|---|------------------------|--|---------|--|--|
| Intitulé : Essai de pose T1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Date : 25/04/2018                                                                                                                                                                                                                                                      |                |                |                        |                |                |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |   |                |   |                |   |                        |  |        |  |                |   |                |   |                        |  |         |  |  |
| Eléments d'essai : DC20 à DC26 (excepté DC23)<br>Ordre de pose : DC20 à DC26 (excepté DC23)<br>GGS : GGS-T, enclenchement manuel                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Elément de base d'essai : DCB1 à DCB4 et DCB7<br>Ecart en éléments de bas d'essai : 102mm<br>Ecart rails de guidage : 154mm                                                                                                                                            |                |                |                        |                |                |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |   |                |   |                |   |                        |  |        |  |                |   |                |   |                        |  |         |  |  |
| Photos :                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                        |                |                |                        |                |                |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |   |                |   |                |   |                        |  |        |  |                |   |                |   |                        |  |         |  |  |
| <div></div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                        |                |                |                        |                |                |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |   |                |   |                |   |                        |  |        |  |                |   |                |   |                        |  |         |  |  |
| <div></div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | <div></div> |                |                |                        |                |                |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |   |                |   |                |   |                        |  |        |  |                |   |                |   |                        |  |         |  |  |
| Mesures :                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                        |                |                |                        |                |                |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |   |                |   |                |   |                        |  |        |  |                |   |                |   |                        |  |         |  |  |
| <table><tr><td>%<sub>DEPT</sub></td><td>100%</td><td><math>\alpha_{s,v}</math></td><td>87,8°</td><td><math>\alpha_{s,L}</math></td><td>0,9°</td><td><math>\alpha_{s,l}</math></td><td>1,8°</td></tr><tr><td><math>\alpha_{i,L}</math></td><td>0,7°</td><td><math>\alpha_{i,l}</math></td><td>1,4°</td><td colspan="4"></td></tr><tr><td><math>\delta_{l,1}</math></td><td>7mm</td><td><math>\delta_{l,2}</math></td><td>0mm</td><td><math>\delta_{h,1}</math></td><td>4mm</td><td><math>\delta_{h,2}</math></td><td>8mm</td></tr><tr><td><math>\delta_{l,3}</math></td><td>11mm</td><td><math>\delta_{l,4}</math></td><td>9mm</td><td><math>\delta_{h,3}</math></td><td>5mm</td><td><math>\delta_{h,4}</math></td><td>/</td></tr><tr><td><math>\delta_{l,5}</math></td><td>/</td><td><math>\delta_{l,6}</math></td><td>/</td><td colspan="2">Moyenne <math>\delta_{l,i}</math></td><td colspan="2">6,75mm</td></tr><tr><td><math>\delta_{l,7}</math></td><td>/</td><td><math>\delta_{l,8}</math></td><td>/</td><td colspan="2">Moyenne <math>\delta_{h,i}</math></td><td colspan="2">5 ,67mm</td></tr></table> | % <sub>DEPT</sub>                                                                                                                                                                                                                                                      | 100%           | $\alpha_{s,v}$ | 87,8°                  | $\alpha_{s,L}$ | 0,9°           | $\alpha_{s,l}$ | 1,8° | $\alpha_{i,L}$ | 0,7° | $\alpha_{i,l}$ | 1,4° |  |  |  |  | $\delta_{l,1}$ | 7mm | $\delta_{l,2}$ | 0mm | $\delta_{h,1}$ | 4mm | $\delta_{h,2}$ | 8mm | $\delta_{l,3}$ | 11mm | $\delta_{l,4}$ | 9mm | $\delta_{h,3}$ | 5mm | $\delta_{h,4}$ | / | $\delta_{l,5}$ | / | $\delta_{l,6}$ | / | Moyenne $\delta_{l,i}$ |  | 6,75mm |  | $\delta_{l,7}$ | / | $\delta_{l,8}$ | / | Moyenne $\delta_{h,i}$ |  | 5 ,67mm |  |  |
| % <sub>DEPT</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 100%                                                                                                                                                                                                                                                                   | $\alpha_{s,v}$ | 87,8°          | $\alpha_{s,L}$         | 0,9°           | $\alpha_{s,l}$ | 1,8°           |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |   |                |   |                |   |                        |  |        |  |                |   |                |   |                        |  |         |  |  |
| $\alpha_{i,L}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 0,7°                                                                                                                                                                                                                                                                   | $\alpha_{i,l}$ | 1,4°           |                        |                |                |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |   |                |   |                |   |                        |  |        |  |                |   |                |   |                        |  |         |  |  |
| $\delta_{l,1}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 7mm                                                                                                                                                                                                                                                                    | $\delta_{l,2}$ | 0mm            | $\delta_{h,1}$         | 4mm            | $\delta_{h,2}$ | 8mm            |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |   |                |   |                |   |                        |  |        |  |                |   |                |   |                        |  |         |  |  |
| $\delta_{l,3}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 11mm                                                                                                                                                                                                                                                                   | $\delta_{l,4}$ | 9mm            | $\delta_{h,3}$         | 5mm            | $\delta_{h,4}$ | /              |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |   |                |   |                |   |                        |  |        |  |                |   |                |   |                        |  |         |  |  |
| $\delta_{l,5}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | /                                                                                                                                                                                                                                                                      | $\delta_{l,6}$ | /              | Moyenne $\delta_{l,i}$ |                | 6,75mm         |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |   |                |   |                |   |                        |  |        |  |                |   |                |   |                        |  |         |  |  |
| $\delta_{l,7}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | /                                                                                                                                                                                                                                                                      | $\delta_{l,8}$ | /              | Moyenne $\delta_{h,i}$ |                | 5 ,67mm        |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |   |                |   |                |   |                        |  |        |  |                |   |                |   |                        |  |         |  |  |

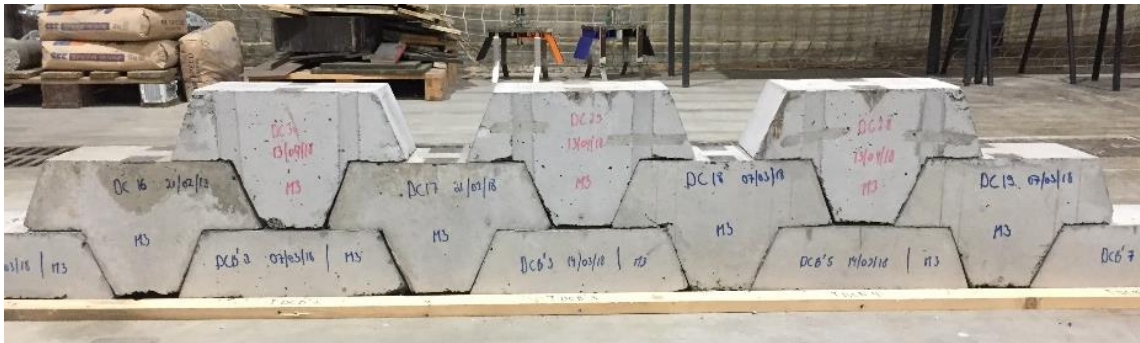
|                                                                                                                                  |                                                                                                                               |                                                                                       |       |                        |      |                |      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------|------------------------|------|----------------|------|
| Intitulé : Essai de pose T2                                                                                                      | Date : 25/04/2018                                                                                                             |                                                                                       |       |                        |      |                |      |
| Eléments d'essai : DC20 à DC26 (excepté DC23)<br>Ordre de pose : DC26 à DC20 (excepté DC23)<br>GGS : GGS-T, enclenchement manuel | Elément de base d'essai : DCB1 à DCB4 et DCB7<br>Ecart en éléments de bas d'essai : 102mm<br>Ecart rails de guidage : 151,5mm |                                                                                       |       |                        |      |                |      |
| Photos :                                                                                                                         |                                                                                                                               |                                                                                       |       |                        |      |                |      |
|                                                |                                                                                                                               |                                                                                       |       |                        |      |                |      |
|                                                |                                             |   |       |                        |      |                |      |
|                                                                                                                                  |                                                                                                                               |  |       |                        |      |                |      |
| Mesures :                                                                                                                        |                                                                                                                               |                                                                                       |       |                        |      |                |      |
| $\%_{DEPT}$                                                                                                                      | 83,3%                                                                                                                         | $\alpha_{s,V}$                                                                        | 89,3° | $\alpha_{s,L}$         | 0,5° | $\alpha_{s,l}$ | 0,9° |
| $\alpha_{i,L}$                                                                                                                   | 0,3°                                                                                                                          | $\alpha_{i,l}$                                                                        | 1,2°  |                        |      |                |      |
| $\delta_{l,1}$                                                                                                                   | 3mm                                                                                                                           | $\delta_{l,2}$                                                                        | 2mm   | $\delta_{h,1}$         | 6mm  | $\delta_{h,2}$ | 10mm |
| $\delta_{l,3}$                                                                                                                   | 4mm                                                                                                                           | $\delta_{l,4}$                                                                        | 1mm   | $\delta_{h,3}$         | 8mm  | $\delta_{h,4}$ | /    |
| $\delta_{l,5}$                                                                                                                   | /                                                                                                                             | $\delta_{l,6}$                                                                        | /     | Moyenne $\delta_{l,i}$ |      | 2,50mm         |      |
| $\delta_{l,7}$                                                                                                                   | /                                                                                                                             | $\delta_{l,8}$                                                                        | /     | Moyenne $\delta_{h,i}$ |      | 8,00mm         |      |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                               |                |                |                        |                |                |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |   |                |   |                |   |                        |  |        |  |                |   |                |   |                        |  |        |  |  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------|------------------------|----------------|----------------|----------------|------|----------------|------|----------------|------|--|--|--|--|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|---|----------------|---|----------------|---|------------------------|--|--------|--|----------------|---|----------------|---|------------------------|--|--------|--|--|
| Intitulé : Essai de pose T3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Date : 25/04/2018                                                                                                             |                |                |                        |                |                |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |   |                |   |                |   |                        |  |        |  |                |   |                |   |                        |  |        |  |  |
| Eléments d'essai : DC20 à DC26 (excepté DC23)<br>Ordre de pose : DC20 à DC26 (excepté DC23)<br>GGS : GGS-T, enclenchement manuel                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Elément de base d'essai : DCB1 à DCB4 et DCB7<br>Ecart en éléments de bas d'essai : 105mm<br>Ecart rails de guidage : 151,5mm |                |                |                        |                |                |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |   |                |   |                |   |                        |  |        |  |                |   |                |   |                        |  |        |  |  |
| Photos :                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                               |                |                |                        |                |                |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |   |                |   |                |   |                        |  |        |  |                |   |                |   |                        |  |        |  |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                               |                |                |                        |                |                |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |   |                |   |                |   |                        |  |        |  |                |   |                |   |                        |  |        |  |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                             |                |                |                        |                |                |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |   |                |   |                |   |                        |  |        |  |                |   |                |   |                        |  |        |  |  |
| <br>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                               |                |                |                        |                |                |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |   |                |   |                |   |                        |  |        |  |                |   |                |   |                        |  |        |  |  |
| Mesures :                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                               |                |                |                        |                |                |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |   |                |   |                |   |                        |  |        |  |                |   |                |   |                        |  |        |  |  |
| <table><tr><td>%DEPT</td><td>83,3%</td><td><math>\alpha_{s,V}</math></td><td>87,5°</td><td><math>\alpha_{s,L}</math></td><td>0,3°</td><td><math>\alpha_{s,l}</math></td><td>0,3°</td></tr><tr><td><math>\alpha_{i,L}</math></td><td>1,4°</td><td><math>\alpha_{i,l}</math></td><td>0,2°</td><td colspan="4"></td></tr><tr><td><math>\delta_{l,1}</math></td><td>1mm</td><td><math>\delta_{l,2}</math></td><td>1mm</td><td><math>\delta_{h,1}</math></td><td>3mm</td><td><math>\delta_{h,2}</math></td><td>3mm</td></tr><tr><td><math>\delta_{l,3}</math></td><td>1mm</td><td><math>\delta_{l,4}</math></td><td>3mm</td><td><math>\delta_{h,3}</math></td><td>5mm</td><td><math>\delta_{h,4}</math></td><td>/</td></tr><tr><td><math>\delta_{l,5}</math></td><td>/</td><td><math>\delta_{l,6}</math></td><td>/</td><td colspan="2">Moyenne <math>\delta_{l,i}</math></td><td colspan="2">1,50mm</td></tr><tr><td><math>\delta_{l,7}</math></td><td>/</td><td><math>\delta_{l,8}</math></td><td>/</td><td colspan="2">Moyenne <math>\delta_{h,i}</math></td><td colspan="2">3,67mm</td></tr></table> | %DEPT                                                                                                                         | 83,3%          | $\alpha_{s,V}$ | 87,5°                  | $\alpha_{s,L}$ | 0,3°           | $\alpha_{s,l}$ | 0,3° | $\alpha_{i,L}$ | 1,4° | $\alpha_{i,l}$ | 0,2° |  |  |  |  | $\delta_{l,1}$ | 1mm | $\delta_{l,2}$ | 1mm | $\delta_{h,1}$ | 3mm | $\delta_{h,2}$ | 3mm | $\delta_{l,3}$ | 1mm | $\delta_{l,4}$ | 3mm | $\delta_{h,3}$ | 5mm | $\delta_{h,4}$ | / | $\delta_{l,5}$ | / | $\delta_{l,6}$ | / | Moyenne $\delta_{l,i}$ |  | 1,50mm |  | $\delta_{l,7}$ | / | $\delta_{l,8}$ | / | Moyenne $\delta_{h,i}$ |  | 3,67mm |  |  |
| %DEPT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 83,3%                                                                                                                         | $\alpha_{s,V}$ | 87,5°          | $\alpha_{s,L}$         | 0,3°           | $\alpha_{s,l}$ | 0,3°           |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |   |                |   |                |   |                        |  |        |  |                |   |                |   |                        |  |        |  |  |
| $\alpha_{i,L}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 1,4°                                                                                                                          | $\alpha_{i,l}$ | 0,2°           |                        |                |                |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |   |                |   |                |   |                        |  |        |  |                |   |                |   |                        |  |        |  |  |
| $\delta_{l,1}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 1mm                                                                                                                           | $\delta_{l,2}$ | 1mm            | $\delta_{h,1}$         | 3mm            | $\delta_{h,2}$ | 3mm            |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |   |                |   |                |   |                        |  |        |  |                |   |                |   |                        |  |        |  |  |
| $\delta_{l,3}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 1mm                                                                                                                           | $\delta_{l,4}$ | 3mm            | $\delta_{h,3}$         | 5mm            | $\delta_{h,4}$ | /              |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |   |                |   |                |   |                        |  |        |  |                |   |                |   |                        |  |        |  |  |
| $\delta_{l,5}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | /                                                                                                                             | $\delta_{l,6}$ | /              | Moyenne $\delta_{l,i}$ |                | 1,50mm         |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |   |                |   |                |   |                        |  |        |  |                |   |                |   |                        |  |        |  |  |
| $\delta_{l,7}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | /                                                                                                                             | $\delta_{l,8}$ | /              | Moyenne $\delta_{h,i}$ |                | 3,67mm         |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |   |                |   |                |   |                        |  |        |  |                |   |                |   |                        |  |        |  |  |

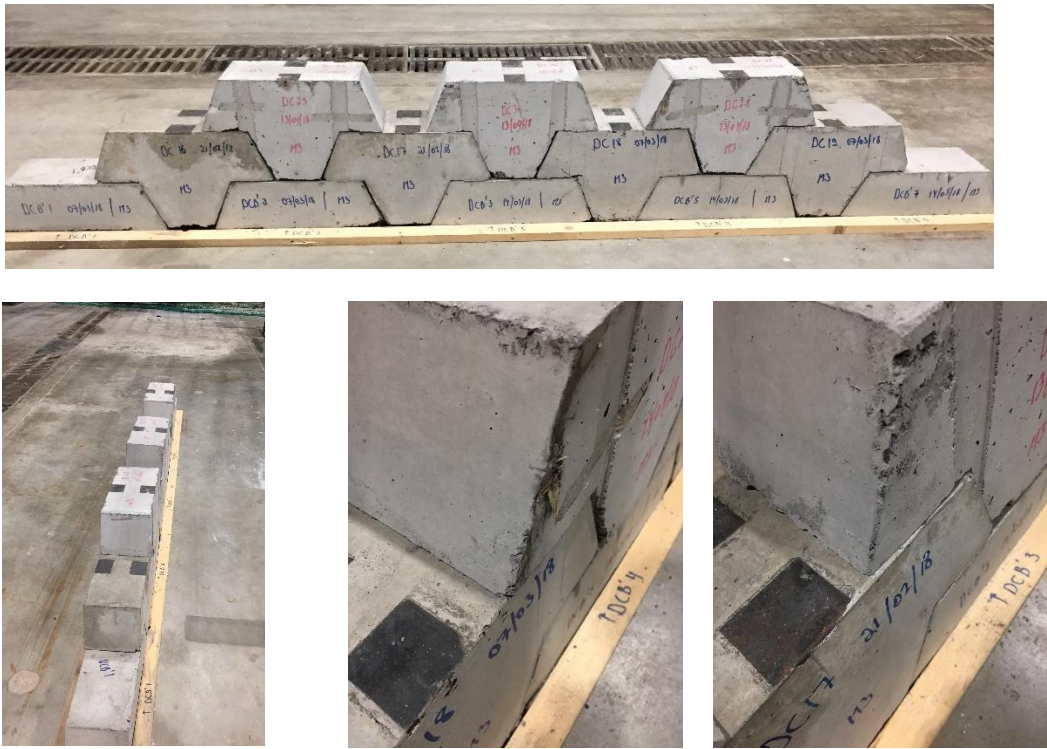
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                             |                |                |                        |                |                |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |      |                |      |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |         |  |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------|------------------------|----------------|----------------|----------------|------|----------------|------|----------------|------|--|--|--|--|----------------|-----|----------------|-----|----------------|------|----------------|------|----------------|-----|----------------|-----|----------------|------|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|------------------------|--|--------|--|----------------|-----|----------------|-----|------------------------|--|---------|--|--|
| Intitulé : Essai de pose G1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Date : 09/05/2018                                                                                                           |                |                |                        |                |                |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |      |                |      |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |         |  |  |
| Eléments d'essai : DC12 à DC19<br>Ordre de pose : DC19 à DC12<br>GGS : GGS-G, rotation manuelle du crochet anti-fermeture                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Elément de base d'essai : DCB1 à DCB4 et DCB7<br>Ecart en éléments de bas d'essai : 102mm<br>Ecart rails de guidage : 154mm |                |                |                        |                |                |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |      |                |      |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |         |  |  |
| Photos :                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                             |                |                |                        |                |                |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |      |                |      |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |         |  |  |
| <div></div> <div></div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                             |                |                |                        |                |                |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |      |                |      |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |         |  |  |
| Mesures :                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                             |                |                |                        |                |                |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |      |                |      |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |         |  |  |
| <table><tr><td>%DEPT</td><td>100%</td><td><math>\alpha_{s,V}</math></td><td>88,6°</td><td><math>\alpha_{s,L}</math></td><td>3,4°</td><td><math>\alpha_{s,l}</math></td><td>2,2°</td></tr><tr><td><math>\alpha_{i,L}</math></td><td>0,3°</td><td><math>\alpha_{i,l}</math></td><td>0,8°</td><td colspan="4"></td></tr><tr><td><math>\delta_{l,1}</math></td><td>1mm</td><td><math>\delta_{l,2}</math></td><td>3mm</td><td><math>\delta_{h,1}</math></td><td>15mm</td><td><math>\delta_{h,2}</math></td><td>12mm</td></tr><tr><td><math>\delta_{l,3}</math></td><td>2mm</td><td><math>\delta_{l,4}</math></td><td>7mm</td><td><math>\delta_{h,3}</math></td><td>10mm</td><td><math>\delta_{h,4}</math></td><td>9mm</td></tr><tr><td><math>\delta_{l,5}</math></td><td>6mm</td><td><math>\delta_{l,6}</math></td><td>8mm</td><td colspan="2">Moyenne <math>\delta_{l,i}</math></td><td colspan="2">4,25mm</td></tr><tr><td><math>\delta_{l,7}</math></td><td>3mm</td><td><math>\delta_{l,8}</math></td><td>4mm</td><td colspan="2">Moyenne <math>\delta_{h,i}</math></td><td colspan="2">11,50mm</td></tr></table> | %DEPT                                                                                                                       | 100%           | $\alpha_{s,V}$ | 88,6°                  | $\alpha_{s,L}$ | 3,4°           | $\alpha_{s,l}$ | 2,2° | $\alpha_{i,L}$ | 0,3° | $\alpha_{i,l}$ | 0,8° |  |  |  |  | $\delta_{l,1}$ | 1mm | $\delta_{l,2}$ | 3mm | $\delta_{h,1}$ | 15mm | $\delta_{h,2}$ | 12mm | $\delta_{l,3}$ | 2mm | $\delta_{l,4}$ | 7mm | $\delta_{h,3}$ | 10mm | $\delta_{h,4}$ | 9mm | $\delta_{l,5}$ | 6mm | $\delta_{l,6}$ | 8mm | Moyenne $\delta_{l,i}$ |  | 4,25mm |  | $\delta_{l,7}$ | 3mm | $\delta_{l,8}$ | 4mm | Moyenne $\delta_{h,i}$ |  | 11,50mm |  |  |
| %DEPT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 100%                                                                                                                        | $\alpha_{s,V}$ | 88,6°          | $\alpha_{s,L}$         | 3,4°           | $\alpha_{s,l}$ | 2,2°           |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |      |                |      |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |         |  |  |
| $\alpha_{i,L}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 0,3°                                                                                                                        | $\alpha_{i,l}$ | 0,8°           |                        |                |                |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |      |                |      |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |         |  |  |
| $\delta_{l,1}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 1mm                                                                                                                         | $\delta_{l,2}$ | 3mm            | $\delta_{h,1}$         | 15mm           | $\delta_{h,2}$ | 12mm           |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |      |                |      |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |         |  |  |
| $\delta_{l,3}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 2mm                                                                                                                         | $\delta_{l,4}$ | 7mm            | $\delta_{h,3}$         | 10mm           | $\delta_{h,4}$ | 9mm            |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |      |                |      |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |         |  |  |
| $\delta_{l,5}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 6mm                                                                                                                         | $\delta_{l,6}$ | 8mm            | Moyenne $\delta_{l,i}$ |                | 4,25mm         |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |      |                |      |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |         |  |  |
| $\delta_{l,7}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 3mm                                                                                                                         | $\delta_{l,8}$ | 4mm            | Moyenne $\delta_{h,i}$ |                | 11,50mm        |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |      |                |      |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |         |  |  |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                |       |                        |      |                |      |       |      |                |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-------|------------------------|------|----------------|------|-------|------|----------------|-------|----------------|------|----------------|------|----------------|------|----------------|------|--|--|--|--|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|------|----------------|-----|----------------|-----|----------------|------|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|------------------------|--|--------|--|----------------|-----|----------------|-----|------------------------|--|--------|--|
| Intitulé : Essai de pose G2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Date : 09/05/2018                                                                                                                                                                                                                                                                  |                |       |                        |      |                |      |       |      |                |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |
| Eléments d'essai : DC12 à DC19<br>Ordre de pose : DC12 à DC19<br>GGS : GGS-G, rotation manuelle du crochet anti-fermeture                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Elément de base d'essai : DCB1 à DCB4 et DCB7<br>Ecart en éléments de bas d'essai : 102mm<br>Ecart rails de guidage : 151,5mm                                                                                                                                                      |                |       |                        |      |                |      |       |      |                |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |
| Photos :                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                |       |                        |      |                |      |       |      |                |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |
| <div></div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                |       |                        |      |                |      |       |      |                |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |
| <div></div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | <div><div></div></div> |                |       |                        |      |                |      |       |      |                |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |
| Mesures :                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                |       |                        |      |                |      |       |      |                |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |
| <table><tr><td>%DEPT</td><td>100%</td><td><math>\alpha_{s,V}</math></td><td>89,7°</td><td><math>\alpha_{s,L}</math></td><td>0,2°</td><td><math>\alpha_{s,l}</math></td><td>1,1°</td></tr><tr><td><math>\alpha_{i,L}</math></td><td>0,2°</td><td><math>\alpha_{i,l}</math></td><td>0,6°</td><td colspan="4"></td></tr><tr><td><math>\delta_{l,1}</math></td><td>0mm</td><td><math>\delta_{l,2}</math></td><td>0mm</td><td><math>\delta_{h,1}</math></td><td>8mm</td><td><math>\delta_{h,2}</math></td><td>10mm</td></tr><tr><td><math>\delta_{l,3}</math></td><td>3mm</td><td><math>\delta_{l,4}</math></td><td>2mm</td><td><math>\delta_{h,3}</math></td><td>12mm</td><td><math>\delta_{h,4}</math></td><td>8mm</td></tr><tr><td><math>\delta_{l,5}</math></td><td>2mm</td><td><math>\delta_{l,6}</math></td><td>1mm</td><td colspan="2">Moyenne <math>\delta_{l,i}</math></td><td colspan="2">1,38mm</td></tr><tr><td><math>\delta_{l,7}</math></td><td>2mm</td><td><math>\delta_{l,8}</math></td><td>1mm</td><td colspan="2">Moyenne <math>\delta_{h,i}</math></td><td colspan="2">9,50mm</td></tr></table> |                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                |       |                        |      |                |      | %DEPT | 100% | $\alpha_{s,V}$ | 89,7° | $\alpha_{s,L}$ | 0,2° | $\alpha_{s,l}$ | 1,1° | $\alpha_{i,L}$ | 0,2° | $\alpha_{i,l}$ | 0,6° |  |  |  |  | $\delta_{l,1}$ | 0mm | $\delta_{l,2}$ | 0mm | $\delta_{h,1}$ | 8mm | $\delta_{h,2}$ | 10mm | $\delta_{l,3}$ | 3mm | $\delta_{l,4}$ | 2mm | $\delta_{h,3}$ | 12mm | $\delta_{h,4}$ | 8mm | $\delta_{l,5}$ | 2mm | $\delta_{l,6}$ | 1mm | Moyenne $\delta_{l,i}$ |  | 1,38mm |  | $\delta_{l,7}$ | 2mm | $\delta_{l,8}$ | 1mm | Moyenne $\delta_{h,i}$ |  | 9,50mm |  |
| %DEPT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 100%                                                                                                                                                                                                                                                                               | $\alpha_{s,V}$ | 89,7° | $\alpha_{s,L}$         | 0,2° | $\alpha_{s,l}$ | 1,1° |       |      |                |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |
| $\alpha_{i,L}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 0,2°                                                                                                                                                                                                                                                                               | $\alpha_{i,l}$ | 0,6°  |                        |      |                |      |       |      |                |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |
| $\delta_{l,1}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 0mm                                                                                                                                                                                                                                                                                | $\delta_{l,2}$ | 0mm   | $\delta_{h,1}$         | 8mm  | $\delta_{h,2}$ | 10mm |       |      |                |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |
| $\delta_{l,3}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 3mm                                                                                                                                                                                                                                                                                | $\delta_{l,4}$ | 2mm   | $\delta_{h,3}$         | 12mm | $\delta_{h,4}$ | 8mm  |       |      |                |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |
| $\delta_{l,5}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 2mm                                                                                                                                                                                                                                                                                | $\delta_{l,6}$ | 1mm   | Moyenne $\delta_{l,i}$ |      | 1,38mm         |      |       |      |                |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |
| $\delta_{l,7}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 2mm                                                                                                                                                                                                                                                                                | $\delta_{l,8}$ | 1mm   | Moyenne $\delta_{h,i}$ |      | 9,50mm         |      |       |      |                |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |      |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                               |                |       |                        |      |                |      |       |      |                |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-------|------------------------|------|----------------|------|-------|------|----------------|-------|----------------|------|----------------|------|----------------|------|----------------|------|--|--|--|--|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|------------------------|--|--------|--|----------------|-----|----------------|-----|------------------------|--|--------|--|
| Intitulé : Essai de pose G3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Date : 09/05/2018                                                                                                             |                |       |                        |      |                |      |       |      |                |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |
| Eléments d'essai : DC12 à DC19<br>Ordre de pose : DC16 à DC19 puis DC12 à DC15<br>GGS : GGS-G, rotation manuelle du crochet anti-fermeture                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Elément de base d'essai : DCB1 à DCB4 et DCB7<br>Ecart en éléments de bas d'essai : 105mm<br>Ecart rails de guidage : 151,5mm |                |       |                        |      |                |      |       |      |                |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |
| Photos :                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                               |                |       |                        |      |                |      |       |      |                |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |
| <div></div> <div><div></div></div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                               |                |       |                        |      |                |      |       |      |                |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |
| Mesures :                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                               |                |       |                        |      |                |      |       |      |                |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |
| <table><tr><td>%DEPT</td><td>100%</td><td><math>\alpha_{s,V}</math></td><td>88,1°</td><td><math>\alpha_{s,L}</math></td><td>0,6°</td><td><math>\alpha_{s,l}</math></td><td>1,2°</td></tr><tr><td><math>\alpha_{i,L}</math></td><td>1,1°</td><td><math>\alpha_{i,l}</math></td><td>1,3°</td><td colspan="4"></td></tr><tr><td><math>\delta_{l,1}</math></td><td>0mm</td><td><math>\delta_{l,2}</math></td><td>1mm</td><td><math>\delta_{h,1}</math></td><td>2mm</td><td><math>\delta_{h,2}</math></td><td>7mm</td></tr><tr><td><math>\delta_{l,3}</math></td><td>4mm</td><td><math>\delta_{l,4}</math></td><td>5mm</td><td><math>\delta_{h,3}</math></td><td>5mm</td><td><math>\delta_{h,4}</math></td><td>8mm</td></tr><tr><td><math>\delta_{l,5}</math></td><td>2mm</td><td><math>\delta_{l,6}</math></td><td>3mm</td><td colspan="2">Moyenne <math>\delta_{l,i}</math></td><td colspan="2">3,00mm</td></tr><tr><td><math>\delta_{l,7}</math></td><td>0mm</td><td><math>\delta_{l,8}</math></td><td>4mm</td><td colspan="2">Moyenne <math>\delta_{h,i}</math></td><td colspan="2">5,50mm</td></tr></table> |                                                                                                                               |                |       |                        |      |                |      | %DEPT | 100% | $\alpha_{s,V}$ | 88,1° | $\alpha_{s,L}$ | 0,6° | $\alpha_{s,l}$ | 1,2° | $\alpha_{i,L}$ | 1,1° | $\alpha_{i,l}$ | 1,3° |  |  |  |  | $\delta_{l,1}$ | 0mm | $\delta_{l,2}$ | 1mm | $\delta_{h,1}$ | 2mm | $\delta_{h,2}$ | 7mm | $\delta_{l,3}$ | 4mm | $\delta_{l,4}$ | 5mm | $\delta_{h,3}$ | 5mm | $\delta_{h,4}$ | 8mm | $\delta_{l,5}$ | 2mm | $\delta_{l,6}$ | 3mm | Moyenne $\delta_{l,i}$ |  | 3,00mm |  | $\delta_{l,7}$ | 0mm | $\delta_{l,8}$ | 4mm | Moyenne $\delta_{h,i}$ |  | 5,50mm |  |
| %DEPT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 100%                                                                                                                          | $\alpha_{s,V}$ | 88,1° | $\alpha_{s,L}$         | 0,6° | $\alpha_{s,l}$ | 1,2° |       |      |                |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |
| $\alpha_{i,L}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 1,1°                                                                                                                          | $\alpha_{i,l}$ | 1,3°  |                        |      |                |      |       |      |                |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |
| $\delta_{l,1}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0mm                                                                                                                           | $\delta_{l,2}$ | 1mm   | $\delta_{h,1}$         | 2mm  | $\delta_{h,2}$ | 7mm  |       |      |                |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |
| $\delta_{l,3}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 4mm                                                                                                                           | $\delta_{l,4}$ | 5mm   | $\delta_{h,3}$         | 5mm  | $\delta_{h,4}$ | 8mm  |       |      |                |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |
| $\delta_{l,5}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 2mm                                                                                                                           | $\delta_{l,6}$ | 3mm   | Moyenne $\delta_{l,i}$ |      | 3,00mm         |      |       |      |                |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |
| $\delta_{l,7}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0mm                                                                                                                           | $\delta_{l,8}$ | 4mm   | Moyenne $\delta_{h,i}$ |      | 5,50mm         |      |       |      |                |       |                |      |                |      |                |      |                |      |  |  |  |  |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |                |     |                |     |                        |  |        |  |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                            |                |     |                        |       |                |       |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-----|------------------------|-------|----------------|-------|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|------------------------|--|--------|--|
| Intitulé : Essai de pose G'1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Date : 09/05/2018                                                                                                                          |                |     |                        |       |                |       |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |
| Eléments d'essai : DC28 à DC30<br>Ordre de pose : DC30 à DC28<br>GGS : GGS-G, rotation manuelle du crochet anti-fermeture                                                                                                                                                                                                                                                                                | Elément de base d'essai : DCB1 à DCB4 et DCB7 et DC16 à DC19<br>Ecart en éléments de bas d'essai : 105mm<br>Ecart rails de guidage : 148mm |                |     |                        |       |                |       |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |
| Photos :                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                            |                |     |                        |       |                |       |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                            |                |     |                        |       |                |       |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                            |                |     |                        |       |                |       |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                            |                |     |                        |       |                |       |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                            |                |     |                        |       |                |       |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |
| Mesures :                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                            |                |     |                        |       |                |       |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |
| <table><tr><td><math>\delta_{l,1}</math></td><td>0mm</td><td><math>\delta_{l,2}</math></td><td>0mm</td><td><math>\delta_{l,3}</math></td><td>1,5mm</td><td><math>\delta_{l,4}</math></td><td>1mm</td></tr><tr><td><math>\delta_{l,5}</math></td><td>0mm</td><td><math>\delta_{l,6}</math></td><td>1mm</td><td colspan="2">Moyenne <math>\delta_{l,i}</math></td><td colspan="2">0,58mm</td></tr></table> |                                                                                                                                            | $\delta_{l,1}$ | 0mm | $\delta_{l,2}$         | 0mm   | $\delta_{l,3}$ | 1,5mm | $\delta_{l,4}$ | 1mm | $\delta_{l,5}$ | 0mm | $\delta_{l,6}$ | 1mm | Moyenne $\delta_{l,i}$ |  | 0,58mm |  |
| $\delta_{l,1}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 0mm                                                                                                                                        | $\delta_{l,2}$ | 0mm | $\delta_{l,3}$         | 1,5mm | $\delta_{l,4}$ | 1mm   |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |
| $\delta_{l,5}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 0mm                                                                                                                                        | $\delta_{l,6}$ | 1mm | Moyenne $\delta_{l,i}$ |       | 0,58mm         |       |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                            |                |     |                        |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-----|------------------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|------------------------|--|--------|--|
| Intitulé : Essai de pose G'2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Date : 09/05/2018                                                                                                                          |                |     |                        |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |
| Eléments d'essai : DC28 à DC30<br>Ordre de pose : DC28 à DC30<br>GGS : GGS-G, rotation manuelle du crochet anti-fermeture                                                                                                                                                                                                                                                                              | Elément de base d'essai : DCB1 à DCB4 et DCB7 et DC16 à DC19<br>Ecart en éléments de bas d'essai : 105mm<br>Ecart rails de guidage : 148mm |                |     |                        |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |
| Photos :                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                            |                |     |                        |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                            |                |     |                        |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |
|                                                                                                                                                 |                                                                                                                                            |                |     |                        |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |
| Mesures :                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                            |                |     |                        |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |
| <table><tr><td><math>\delta_{l,1}</math></td><td>1mm</td><td><math>\delta_{l,2}</math></td><td>2mm</td><td><math>\delta_{l,3}</math></td><td>2mm</td><td><math>\delta_{l,4}</math></td><td>2mm</td></tr><tr><td><math>\delta_{l,5}</math></td><td>3mm</td><td><math>\delta_{l,6}</math></td><td>0mm</td><td colspan="2">Moyenne <math>\delta_{l,i}</math></td><td colspan="2">1,67mm</td></tr></table> |                                                                                                                                            |                |     |                        |     |                |     | $\delta_{l,1}$ | 1mm | $\delta_{l,2}$ | 2mm | $\delta_{l,3}$ | 2mm | $\delta_{l,4}$ | 2mm | $\delta_{l,5}$ | 3mm | $\delta_{l,6}$ | 0mm | Moyenne $\delta_{l,i}$ |  | 1,67mm |  |
| $\delta_{l,1}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 1mm                                                                                                                                        | $\delta_{l,2}$ | 2mm | $\delta_{l,3}$         | 2mm | $\delta_{l,4}$ | 2mm |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |
| $\delta_{l,5}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 3mm                                                                                                                                        | $\delta_{l,6}$ | 0mm | Moyenne $\delta_{l,i}$ |     | 1,67mm         |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                |     |                        |  |        |  |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                            |                |     |                        |     |                |       |                |       |                |     |                |     |                        |  |         |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-----|------------------------|-----|----------------|-------|----------------|-------|----------------|-----|----------------|-----|------------------------|--|---------|--|
| Intitulé : Essai de pose G'3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Date : 09/05/2018                                                                                                                          |                |     |                        |     |                |       |                |       |                |     |                |     |                        |  |         |  |
| Eléments d'essai : DC28 à DC30<br>Ordre de pose : DC29, DC30 puis DC28<br>GGS : GGS-G, rotation manuelle du crochet anti-fermeture                                                                                                                                                                                                                                                                        | Elément de base d'essai : DCB1 à DCB4 et DCB7 et DC16 à DC19<br>Ecart en éléments de bas d'essai : 105mm<br>Ecart rails de guidage : 148mm |                |     |                        |     |                |       |                |       |                |     |                |     |                        |  |         |  |
| Photos :                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                            |                |     |                        |     |                |       |                |       |                |     |                |     |                        |  |         |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                            |                |     |                        |     |                |       |                |       |                |     |                |     |                        |  |         |  |
| Mesures :                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                            |                |     |                        |     |                |       |                |       |                |     |                |     |                        |  |         |  |
| <table><tr><td><math>\delta_{l,1}</math></td><td>1mm</td><td><math>\delta_{l,2}</math></td><td>0mm</td><td><math>\delta_{l,3}</math></td><td>1mm</td><td><math>\delta_{l,4}</math></td><td>1,5mm</td></tr><tr><td><math>\delta_{l,5}</math></td><td>2mm</td><td><math>\delta_{l,6}</math></td><td>0mm</td><td colspan="2">Moyenne <math>\delta_{l,i}</math></td><td colspan="2">0 ,92mm</td></tr></table> |                                                                                                                                            | $\delta_{l,1}$ | 1mm | $\delta_{l,2}$         | 0mm | $\delta_{l,3}$ | 1mm   | $\delta_{l,4}$ | 1,5mm | $\delta_{l,5}$ | 2mm | $\delta_{l,6}$ | 0mm | Moyenne $\delta_{l,i}$ |  | 0 ,92mm |  |
| $\delta_{l,1}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 1mm                                                                                                                                        | $\delta_{l,2}$ | 0mm | $\delta_{l,3}$         | 1mm | $\delta_{l,4}$ | 1,5mm |                |       |                |     |                |     |                        |  |         |  |
| $\delta_{l,5}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 2mm                                                                                                                                        | $\delta_{l,6}$ | 0mm | Moyenne $\delta_{l,i}$ |     | 0 ,92mm        |       |                |       |                |     |                |     |                        |  |         |  |

